

# Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/JP2005/014010

International filing date: 01 August 2005 (01.08.2005)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: JP  
Number: 2004-269029  
Filing date: 15 September 2004 (15.09.2004)

Date of receipt at the International Bureau: 29 September 2005 (29.09.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in  
compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland  
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse

日本国特許庁  
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日  
Date of Application: 2004年 9月15日

出願番号  
Application Number: 特願 2004-269029

パリ条約による外国への出願  
に用いる優先権の主張の基礎  
となる出願の国コードと出願  
番号

The country code and number  
of your priority application,  
to be used for filing abroad  
under the Paris Convention, is

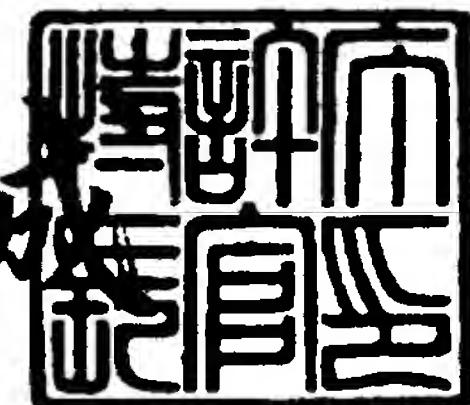
J P 2004-269029

出願人  
Applicant(s): 日本電信電話株式会社

特許庁長官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

2005年 9月 7日

中鳥



【書類名】 特許願  
【整理番号】 NTH165961  
【提出日】 平成16年 9月15日  
【あて先】 特許庁長官 殿  
【国際特許分類】 G02B 6/00  
【発明者】  
　【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内  
　【氏名】 才田 隆志  
【発明者】  
　【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内  
　【氏名】 橋本 俊和  
【発明者】  
　【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内  
　【氏名】 坂巻 陽平  
【発明者】  
　【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内  
　【氏名】 鈴木 扇太  
【発明者】  
　【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内  
　【氏名】 柳澤 雅弘  
【発明者】  
　【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内  
　【氏名】 高橋 浩  
【特許出願人】  
　【識別番号】 000004226  
　【氏名又は名称】 日本電信電話株式会社  
【代理人】  
　【識別番号】 100077481  
　【弁理士】  
　【氏名又は名称】 谷 義一  
【選任した代理人】  
　【識別番号】 100088915  
　【弁理士】  
　【氏名又は名称】 阿部 和夫  
【手数料の表示】  
　【予納台帳番号】 013424  
　【納付金額】 16,000円  
【提出物件の目録】  
　【物件名】 特許請求の範囲 1  
　【物件名】 明細書 1  
　【物件名】 図面 1  
　【物件名】 要約書 1  
　【包括委任状番号】 9701393

【書類名】特許請求の範囲

【請求項1】

入力フィールドから所望の出力フィールドを得るための波導伝搬回路を、コンピュータを用いて設計する方法であって、

前記波動伝搬回路における伝搬媒体の屈折率分布の初期値を前記コンピュータの記憶手段に格納する屈折率分布初期化工程と、

前記伝達媒体の波動伝搬方向の任意の位置を最適化位置に設定する工程と、

前記入力フィールドが前記波動伝搬回路の入口から前記最適化位置まで順伝搬したときのフィールドと、前記所望の出力フィールドが前記波動伝搬回路の出口から前記最適化位置まで逆伝搬したときのフィールドとを計算し、前記コンピュータの記憶手段に格納する最適化位置入出力フィールド計算工程と、

前記入力フィールドが順伝搬したときのフィールドと前記所望の出力フィールドが逆伝搬したときのフィールドとの波面が一致するように前記最適化位置における屈折率分布を調整する屈折率分布改変工程とを含み、

前記最適化位置を波動伝搬方向に変化させながら、前記最適化位置設定工程、最適化位置入出力フィールド計算工程、および前記屈折率分布改変工程を繰り返すことを特徴とする方法。

【請求項2】

入力フィールドから所望の出力フィールドを得るための波導伝搬回路を、コンピュータを用いて設計する方法であって、

前記波導伝搬回路における伝搬媒体の屈折率分布の初期値を前記コンピュータの記憶手段に格納する屈折率分布初期化工程と、

前記波動伝搬回路の出口を最適化位置に設定する工程と、

前記入力フィールドが前記波動伝搬回路の入口から出口まで順伝搬したときのフィールド分布を計算し、前記コンピュータの記憶手段に格納する順伝搬入力フィールド分布計算工程と、

前記出力フィールドが前記波動伝搬回路の出口から前記最適化位置まで逆伝搬したときのフィールドを計算し、前記コンピュータの記憶手段に格納する逆伝搬最適化位置出力フィールド計算工程と、

前記入力フィールドが順伝搬したときのフィールドと前記所望の出力フィールドが逆伝搬したときのフィールドとの波面が一致するように前記最適化位置における屈折率分布を調整する屈折率分布改変工程とを含み、

前記最適化位置を波動伝搬方向に沿って前記出口から前記入口まで順次変化させながら、前記逆伝搬最適化位置出力フィールド計算工程および前記屈折率分布改変工程を繰り返すことを特徴とする方法。

【請求項3】

入力フィールドから所望の出力フィールドを得るための波導伝搬回路を、コンピュータを用いて設計する方法であって、

前記波動伝搬回路における伝搬媒体の屈折率分布の初期値を前記コンピュータの記憶手段に格納する屈折率分布初期化工程と、

前記波動伝搬回路の入口を最適化位置に設定する工程と、

前記出力フィールドが前記波動伝搬回路の出口から入口まで逆伝搬したときのフィールド分布を計算し、前記コンピュータの記憶手段に格納する逆伝搬出力フィールド分布計算工程と、

前記入力フィールドが前記波動伝搬回路の入口から前記最適化位置まで順伝搬したときのフィールドを計算し、前記コンピュータの記憶手段に格納する順伝搬最適化位置入力フィールド計算工程と、

前記入力フィールドが順伝搬したときのフィールドと前記所望の出力フィールドが逆伝搬したときのフィールドとの波面が一致するように前記最適化位置における屈折率分布を調整する屈折率分布改変工程とを含み、

前記最適化位置を波動伝搬方向に沿って前記入口から前記出口まで順次変化させながら、前記順伝搬最適化位置入力フィールド計算工程および前記屈折率分布改変工程を繰り返すことを特徴とする方法。

【請求項4】

入力フィールドから所望の出力フィールドを得るための波導伝搬回路を、コンピュータを用いて設計する方法であって、

請求項1乃至3のいずれかに記載の波導伝搬回路の設計方法を実行することにより得られる調整された前記屈折率分布を、請求項2および請求項3に記載の方法のいずれか一方の屈折率分布初期化工程における屈折率分布の初期値として、請求項2および請求項3のいずれかに記載の方法を実行し、

請求項2および請求項3に記載の方法のいずれか一方を実行することにより得られる調整された前記屈折率分布を、他方の屈折率分布初期化工程における屈折率分布の初期値として、請求項2および請求項3に記載の方法を交互に繰り返すことを特徴とする方法。

【請求項5】

請求項1乃至4のいずれかに記載の方法であって、前記入力フィールドおよび/または前記所望の出力フィールドが複数の波長からなることを特徴とする方法。

【請求項6】

請求項1乃至5のいずれかに記載の方法であって、前記屈折率分布改変工程は、前記最適化位置の少なくとも一部で、前記入力フィールドが順伝搬したときのフィールドと、前記所望の出力フィールドが逆伝搬したときのフィールドとの位相差に比例する屈折率を与える工程であることを特徴とする方法。

【請求項7】

請求項1乃至5のいずれかに記載の方法であって、前記屈折率分布改変工程は、前記最適化位置の少なくとも一部で、前記入力フィールドが順伝搬したときのフィールドと、前記所望の出力フィールドが逆伝搬したときのフィールドとの位相差に従い、コアおよびクラッド層を配設する工程であることを特徴とする方法。

【請求項8】

請求項7に記載の方法であって、前記コアおよびクラッド層を配設する工程は、前記最適化位置の少なくとも一部で、0以上の実数Tに対して、前記位相差がTより大きな箇所にはコアを配設し、Tより小さな箇所にはクラッド層を配設する工程であることを特徴とする方法。

【請求項9】

請求項7または8に記載の方法であって、前記コアおよびクラッド層を配設する工程が、前記最適化位置の少なくとも一部で、前記コアのサイズが波動の波長程度の大きさになるという制限下でコアおよびクラッド層を配設することを特徴とする方法。

【請求項10】

請求項7乃至9のいずれかに記載の方法であって、前記コアおよびクラッド層を配設する工程は、コアとクラッド層との境界部においてのみコアを配設あるいは取り除くという制限下でコアおよびクラッド層を配設することを特徴とする方法。

【請求項11】

請求項1乃至10のいずれかに記載の方法であって、前記フィールド計算工程または前記フィールド分布計算工程が、ビーム伝搬法、有限差分時間領域法、およびモードマッチング法のいずれかであることを特徴とする方法。

【請求項12】

請求項1乃至11のいずれかに記載の方法を実行することを特徴とするコンピュータプログラム。

【請求項13】

請求項12に記載のコンピュータプログラムを記憶したことを特徴とするコンピュータ読み取り可能な記憶媒体。

【書類名】明細書

【発明の名称】波動伝搬回路の設計方法およびコンピュータプログラム

【技術分野】

【0001】

本発明は、波導伝搬回路を最適化するための設計方法および該設計方法を実行するためのコンピュータプログラムに関する。

【背景技術】

【0002】

光通信システムの急速な普及に伴い、光信号を分岐したり光路を切り替えたり、あるいは波長毎に合分波するための光回路の重要性が増している。高性能な光通信システムを構築し提供するためには、高性能な光回路を設計し実現することが必須である。

【0003】

光回路は、チャネル光導波路、テープ光導波路、スラブ光導波路などの個別光回路要素を組み合わせることで設計できる。しかし、このような設計方法を用いるとすると、たとえば極めて長さの小さなスポットサイズ変換器など、従来の光回路要素の組み合わせで実現できない機能を発現することはできない。このような場合、従来は遺伝的アルゴリズムなどのトライアンドエラー型の最適化手法を用いた光回路の設計が行われていた。

【0004】

図1は従来の遺伝的アルゴリズムによる光回路の設計方法を表す図である（例えば、非特許文献1参照）。

【0005】

図1の従来のアルゴリズムは、屈折率分布群の初期値を与える工程101と、遺伝的アルゴリズムにより屈折率分布群を変化させる工程102と、変化させた屈折率分布群を、実際に光を伝搬させて評価する工程103と、良好な屈折率分布群を選別する工程104と、得られた屈折率分布が所望の特性を満たしているか判断する工程105とを含んでいる。最初に工程101、工程102、工程103、工程104、工程105と進み、工程105で所望の特性が得られていなければ、所望の特性が得られるまで工程102から工程104までを繰り返すアルゴリズムである。

【0006】

ここで、従来のアルゴリズムの工程102では屈折率分布群を遺伝的アルゴリズムに従い改変するが、この改変が良い方向への変化か否かは、工程105で実際に光を伝搬させるまでは分からなかった。

【0007】

図2は従来の遺伝的アルゴリズムにより設計された光回路（この例はスポットサイズ変換器）である（例えば、非特許文献2参照）。

【0008】

図2の光回路では、厚さが一定のコア201がクラッド層202の中に埋め込まれた構造になっている。

【0009】

光伝搬方向をz軸としたとき、図2(a)は、x軸方向からy軸上の屈折率分布を観察した図面であり、図2(b)は、y軸方向からx軸上の屈折率分布を観察した図面である。図2に示す従来の光回路では、図2(b)に示したように、屈折率分布をz軸方向に一定の長さを持つセグメント（この例では $3\mu\text{m}$ ）に分割して、各セグメントのx軸方向の幅を遺伝的アルゴリズムにより調整することで、光回路の最適化を実現している。

【0010】

【非特許文献1】B. Plaum, 外3名, "Optimization of waveguide bends and bent mode converters using a genetic algorithm", 25th International Conference on Infrared and Millimeter Waves (IRMMW2000), Sept. 12-15, 2000

【非特許文献2】M. M. Spuhler, 外5名, "A very short planar silica spot-size converter", Journal of Lightwave Technology, vol. 16, no. 9, pp. 1680-1685

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0011】

しかしながら、従来の光回路の設計方法では、トライアンドエラー型のアルゴリズムを用いていたために、光回路を変化させるたびに光回路に入力フィールドを入力して、伝搬後の出力フィールドを評価する必要があった。このように、ある部分の屈折率を増やすか減らすかについて必ず波動伝搬の計算を行う必要があったので、計算時間が非常に大きくなるという問題があった。

【0012】

さらに、計算時間が大きくなるという理由から、光回路を自由に改変して検討を行うことは極めて困難であった。

【0013】

例えば、図2に示す従来の光回路では、屈折率分布をセグメントに分割しx軸方向の幅だけを変えていた（例えば、非特許文献2参照。）。これは、このような制限を加えない限り計算時間が膨大になってしまい現実的に解くことができなかったからである。

【0014】

本発明はこのような問題に鑑みてなされたもので、その目的とするところは、最適化された波動伝搬回路を高速に設計する方法、および該方法を実行するコンピュータプログラムを提供する。

【課題を解決するための手段】

【0015】

本発明は、このような目的を達成するために、請求項1に記載の発明は、入力フィールドから所望の出力フィールドを得るための波導伝搬回路を、コンピュータを用いて設計する方法であって、前記波動伝搬回路における伝搬媒体の屈折率分布の初期値を前記コンピュータの記憶手段に格納する屈折率分布初期化工程と、前記伝達媒体の波動伝搬方向の任意の位置を最適化位置に設定する工程と、前記入力フィールドが前記波動伝搬回路の入口から前記最適化位置まで順伝搬したときのフィールドと、前記所望の出力フィールドが前記波動伝搬回路の出口から前記最適化位置まで逆伝搬したときのフィールドとを計算し、前記コンピュータの記憶手段に格納する最適化位置入出力フィールド計算工程と、前記入力フィールドが順伝搬したときのフィールドと前記所望の出力フィールドが逆伝搬したときのフィールドとの波面が一致するように前記最適化位置における屈折率分布を調整する屈折率分布改変工程とを含み、前記最適化位置を波動伝搬方向に変化させながら、前記最適化位置設定工程、前記最適化位置入出力フィールド計算工程、および前記屈折率分布改変工程を繰り返すことを特徴とする。

【0016】

請求項2に記載の発明は、入力フィールドから所望の出力フィールドを得るための波導伝搬回路を、コンピュータを用いて設計する方法であって、前記波導伝搬回路における伝搬媒体の屈折率分布の初期値を前記コンピュータの記憶手段に格納する屈折率分布初期化工程と、前記波動伝搬回路の出口を最適化位置に設定する工程と、前記入力フィールドが前記波動伝搬回路の入口から出口まで順伝搬したときのフィールド分布を計算し、前記コンピュータの記憶手段に格納する順伝搬入力フィールド分布計算工程と、前記出力フィールドが前記波動伝搬回路の出口から前記最適化位置まで逆伝搬したときのフィールドを計算し、前記コンピュータの記憶手段に格納する逆伝搬最適化位置出力フィールド計算工程と、前記入力フィールドが順伝搬したときのフィールドと前記所望の出力フィールドが逆伝搬したときのフィールドとの波面が一致するように前記最適化位置における屈折率分布を調整する屈折率分布改変工程とを含み、前記最適化位置を波動伝搬方向に沿って前記出口から前記入口まで順次変化させながら、前記逆伝搬最適化位置出力フィールド計算工程および前記屈折率分布改変工程を繰り返すことを特徴とする。

【0017】

請求項3に記載の発明は、入力フィールドから所望の出力フィールドを得るための波導伝搬回路を、コンピュータを用いて設計する方法であって、前記波動伝搬回路における伝搬媒体の屈折率分布の初期値を前記コンピュータの記憶手段に格納する屈折率分布初期化工程と、前記波動伝搬回路の入口を最適化位置に設定する工程と、前記出力フィールドが前記波動伝搬回路の出口から入口まで逆伝搬したときのフィールド分布を計算し、前記コンピュータの記憶手段に格納する逆伝搬出力フィールド分布計算工程と、前記入力フィールドが前記波動伝搬回路の入口から前記最適化位置まで順伝搬したときのフィールドを計算し、前記コンピュータの記憶手段に格納する順伝搬最適化位置入力フィールド計算工程と、前記入力フィールドが順伝搬したときのフィールドと前記所望の出力フィールドが逆伝搬したときのフィールドとの波面が一致するよう前記最適化位置における屈折率分布を調整する屈折率分布改変工程とを含み、前記最適化位置を波動伝搬方向に沿って前記入口から前記出口まで順次変化させながら、前記順伝搬最適化位置入力フィールド計算工程および前記屈折率分布改変工程を繰り返すことを特徴とする。

#### 【0018】

これらの波導伝搬回路の設計方法を用いることで、トライアンドエラー型ではない、決定論的な波動伝搬回路の設計方法を提供できる。

#### 【0019】

請求項4に記載の発明は、入力フィールドから所望の出力フィールドを得るための波導伝搬回路を、コンピュータを用いて設計する方法であって、請求項1乃至3のいずれかに記載の波導伝搬回路の設計方法を実行することにより得られる調整された前記屈折率分布を、請求項2および請求項3に記載の方法のいずれか一方の屈折率分布初期化工程における屈折率分布の初期値として、請求項2および請求項3のいずれかに記載の方法を実行し、請求項2および請求項3に記載の方法のいずれか一方を実行することにより得られる調整された前記屈折率分布を、他方の屈折率分布初期化工程における屈折率分布の初期値として、請求項2および請求項3に記載の方法を交互に繰り返すことを特徴とする。請求項1に記載した波導伝搬回路の設計の方法を実行した後に、さらに請求項2および3に示した波導伝搬回路の設計方法を交互に繰り返すことによって、良好な特性を有する波導伝搬回路を得ることができる。

#### 【0020】

請求項5に記載の発明は、請求項1乃至4のいずれかに記載の方法であって、前記入力フィールドおよび／または前記所望の出力フィールドが複数の波長からなることを特徴とする。入力フィールドおよび所望の出力フィールドの少なくとも何れか一方が複数の波長からなるように設定することで、波長依存性のある波動伝搬回路を得ることができる。

#### 【0021】

請求項6に記載の発明は、請求項1乃至5のいずれかに記載の波導伝搬回路の設計方法であって、前記屈折率分布改変工程は、前記最適化位置の少なくとも一部で、前記入力フィールドが順伝搬したときのフィールドと、前記所望の出力フィールドが逆伝搬したときのフィールドとの位相差に比例する屈折率を与える工程であることを特徴とする。このようにすれば、アナログ的な屈折率により最適化された波動伝搬回路を得ることができる。

#### 【0022】

請求項7に記載の発明は、請求項1乃至5のいずれかに記載の方法であって、前記屈折率分布改変工程は、前記最適化位置の少なくとも一部で、前記入力フィールドが順伝搬したときのフィールドと、前記所望の出力フィールドが逆伝搬したときのフィールドとの位相差に従い、コアおよびクラッド層を配設する工程であることを特徴とする。

#### 【0023】

請求項8に記載の発明は、請求項7に記載の方法であって、前記コアおよびクラッド層を配設する工程は、前記最適化位置の少なくとも一部で、0以上の実数Tに対して、前記位相差がTより大きな箇所にはコアを配設し、Tより小さな箇所にはクラッド層を配設する工程であることを特徴とする。このようにすれば、コアとクラッド層の2材料からなる作製の容易な波動伝搬回路を提供できる。

#### 【0024】

請求項9に記載の発明は、請求項7または8に記載の方法であって、前記コアおよびクラッド層を配設する工程が、前記最適化位置の少なくとも一部で、前記コアのサイズが波動の波長程度の大きさになるという制限下でコアおよびクラッド層を配設することを特徴とする。このようにすることで、作製の容易な波動伝搬回路を提供できる。

#### 【0025】

請求項10に記載の発明は、請求項7乃至9のいずれかに記載の方法であって、前記コアおよびクラッド層を配設する工程は、コアとクラッド層との境界部においてのみコアを配設あるいは取り除くという制限下でコアおよびクラッド層を配設することを特徴とする。このようにすることで、光の散逸の少ない波動伝搬回路を提供できる。

#### 【0026】

請求項11に記載の発明は、請求項1乃至10のいずれかに記載の方法であって、前記フィールド計算工程または前記フィールド分布計算工程が、ビーム伝搬法、有限差分時間領域法、およびモードマッチング法のいずれかであることを特徴とする。

#### 【発明の効果】

#### 【0027】

本発明により、高速に波動伝搬回路の最適化する方法を提供することができる。

#### 【発明を実施するための最良の形態】

#### 【0028】

以下に、図面を参照して本発明の実施形態について説明する。なお、本実施形態において、同一機能を有する部分には同一符号を付し、その重複説明は省略する。

#### 【0029】

また、以下の実施形態では、波動伝搬回路の波動伝搬方向をz軸とし、z軸に直交する2軸をx軸、y軸として、波動の入口位置をz=0、波動の出口位置をz=Lとする。

#### 【0030】

加えて、本発明の実施形態では、波動として光波を取り扱い、波動伝搬回路として光回路を取り扱う。これは、光波でもマイクロ波でもミリ波でも、波動伝搬回路の設計方法として本質的な差異はないからである。本発明は勿論この例に限定されるものではなく、波動伝搬回路はマイクロ波回路でもミリ波回路でも勿論構わない。

#### 【0031】

さらに、以下に示す本発明の実施形態では、光回路の具体例として、石英ガラスのクラッド層に埋め込まれた一定の厚さの石英ガラスのコアからなる石英ガラス光導波路による平面光回路を取り扱う。これは、この構造が精密な光回路を提供でき、本発明の効果が顕著に現れた光回路を提供できるからである。しかしながら、本発明はこの例に限定されるものではなく、材料はポリマーや半導体など別の材料であっても良い。また光回路の構造は、構造の一部または全部が三次元的変化する別の構造であってもよい。

#### 【0032】

図3に本発明の第一の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法のアルゴリズムを示す。図3に示す第一の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法では、屈折率分布n(x, y, z)の初期値を決定してコンピュータのメモリに格納する工程11と、最適化位置を光伝搬方向の位置z=z<sub>0</sub>に設定する工程12と、入力フィールドΦ(x, y, 0)が入口z=0から最適化位置z=z<sub>0</sub>まで順伝搬したときのフィールドΦ(x, y, z<sub>0</sub>)、及び所望の出力フィールドΨ(x, y, L)が出口z=Lから最適化位置z=z<sub>0</sub>まで逆伝搬したときのフィールドΨ(x, y, z<sub>0</sub>)を計算してコンピュータのメモリに格納する工程13と、入口から最適化位置まで順伝搬した入力フィールドと出口から最適化位置まで逆伝搬した出力フィールドとの波面が一致するようにコンピュータで屈折率分布n(x, y, z<sub>0</sub>)を改変する工程14と、最適化位置の走査が終了したかを判断する工程15を含んでいる。工程15の判断結果が満足するまで工程12～15を繰り返す。

#### 【0033】

ここで、図3の本発明の第一の実施形態の波動伝搬回路の設計方法では、工程11およ

び工程13の結果をコンピュータのメモリに格納するとしたが、これはこの方法が高速にコンピュータにより計算できる手法を提供できるからである。しかしながら、本発明はこの例に限定されるものではなく、工程11および工程13の結果は、ハードディスクなど他のコンピュータが読み取り可能な記憶装置に格納してもよい。

#### 【0034】

次に式を用いて、第一の実施形態の最適化方法について説明する。本発明の波動伝搬回路の設計方法には、波動伝達媒体の基本概念を適用する。波動伝達媒体に係る理論は一般的の波動方程式に基づいて媒質の特性を指定するものであり、一般的の波動においても原理的に成り立ち得るものである。本実施形態では光回路へ適用することから、波動伝達媒体中を伝搬する「波動」は「光」である。

#### 【0035】

工程13において計算される入力フィールド $\Phi(x, y, 0)$ を入口 $z=0$ から最適化位置 $z=z_0$ まで順伝搬させたときのフィールド $\Phi(x, y, z_0)$ は、 $z=0$ から $z=z_0$ に至る波動伝搬演算子を $H_1$ として、次式で与えられる。

$$\Phi(x, y, z_0) = H_1 \Phi(x, y, 0) \quad (1)$$

また、工程13において計算される出力フィールド $\Psi(x, y, L)$ を出口 $z=L$ から最適化位置 $z=z_0$ まで逆伝搬させたときのフィールド $\Psi(x, y, z_0)$ は、 $z=z_0$ から $z=L$ に至る波動伝搬演算子を $H_2$ として、次式で与えられる。

$$\Psi^*(x, y, z_0) = \Psi^*(x, y, L) H_2 \quad (2)$$

\*ここでは複素共役を表しており、フィールドの進行方向が逆方向であることを示している。

#### 【0036】

さて、工程13により求められたフィールド $\Phi(x, y, z_0)$ および $\Psi(x, y, z_0)$ の結合定数は、

#### 【0037】

##### 【数1】

$$\iint \psi^*(x, y, z_0) \phi(x, y, z_0) dx dy = \iint \psi^*(x, y, L) H_2 H_1 \phi(x, y, 0) dx dy \quad (3)$$

#### 【0038】

と表される。ここで、 $H_2 H_1$ が $z=z_0$ から $z=L$ に至る波動伝搬演算子であることを考慮すると、式(3)は

#### 【0039】

##### 【数2】

$$\iint \psi^*(x, y, L) H_2 H_1 \phi(x, y, 0) dx dy = \iint \psi^*(x, y, L) \phi(x, y, L) dx dy \quad (4)$$

#### 【0040】

と書くことができる。

#### 【0041】

ここで、式(4)の右辺は、入力フィールドを入口より伝搬させたときに出口で得られるフィールド $\Phi(x, y, L)$ と、所望の出力フィールド $\Psi(x, y, L)$ との結合係数を表している。すなわち、両フィールドの波面が一致するように最適化位置の屈折率分布 $n(x, y, z_0)$ を変形すれば、フィールド $\Phi(x, y, z_0)$ と $\Psi^*(x, y, z_0)$ との結合定数が向上するので、入力フィールドを入口より伝搬させたときに出口で得られるフィールド $\Phi(x, y, L)$ は所望の出力フィールド $\Psi(x, y, L)$ に近づく。

#### 【0042】

このように、図3に示した本発明の第一の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法によれば、フィールド $\Phi(x, y, z_0)$ および $\Psi^*(x, y, z_0)$ の波面が一致するように屈折率分布 $n(x, y, z_0)$ を改変することで、入力フィールドを所望の出力フィールドへ近づけることができる。

#### 【0043】

本発明の第一の実施形態に係る波動伝搬回路の設計法では決定論的に屈折率分布を与えることができるので、屈折率分布を変えてみて入力フィールドを伝搬させて結果から判断するトライアンドエラー的な手法と比較して、波動伝搬回路の最適化の大幅な高速を実現できる。

#### 【0044】

図4は、本発明の第一の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法における光回路の屈折率分布の初期値を示している。図4に示した光回路では、一定膜厚のコア51がクラッド層52に埋め込まれた構造になっている。クラッド層52の屈折率は1.44428であり厚さは60 $\mu$ m、コア51の屈折率は1.45523で厚さは6 $\mu$ mである。コア51は、直線光導波路53と扇状光導波路54とから構成されている。直線光導波路53の長さは600 $\mu$ m、幅は7 $\mu$ mであり、扇状光導波路54の長さは400 $\mu$ m、幅は32 $\mu$ mである。光回路の入口はz=0、出口はz=L=1000 $\mu$ mである。また、図4において、最適化位置は符号55で示されている。

#### 【0045】

続いて、図3に示した本発明の第一の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法に従って波動伝搬回路の最適化を行った。ここで、入力フィールドは直線光導波路53の基底モードのフィールドとし、所望の出力フィールドは光回路が二分岐回路として働くように、前記基底モードが18 $\mu$ m離れて平行したフィールドとした。ここで、本発明の第一の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法では、光回路が二分岐として働くように最適化を行ったが、これは三分岐でも四分岐でも、あるいはスポットサイズ変換や導波路交差損失低減など別の機能でも勿論構わない。

#### 【0046】

また、本実施形態では、最適化位置55を扇状の領域54からランダムに選択し、選択した最適化位置55の最適化する走査を行った。z=0からz=Lまでのすべての領域が走査されなくてもよい。しかしながら、最適化位置55はどのようにスキャンしてもよく、z=0からz=Lまでのすべての領域を走査してもよい。

#### 【0047】

さらに、図3に示す本発明の第一の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法では、工程13のフィールド計算は有限差分時間領域法を用いてコンピュータにより行った。しかしながら、本発明はこの例に限定されるものではなく、フィールド計算はビーム伝搬法で行っても、モードマッチング法でおこなっても、別の計算法を用いて行っても勿論構わない。

#### 【0048】

加えて、図3に示す本発明の第一の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法では、工程14において、波面を一致させるために位相差に比例した屈折率分布n(x, y, z<sub>0</sub>)を与えた。図5は、この屈折率分布の与え方を示している。図5(a)は、入力フィールドを順伝搬させたフィールドと所望の出力フィールドを逆伝搬させたフィールドの位相差であり、図5(b)は、この位相差に比例する屈折率分布である。このように、位相差を補償するような屈折率分布を与えることで、順伝搬させたフィールドと逆伝搬させたフィールドの結合係数を向上させることができ、結果として、入力フィールドを入力したときの出力を所望のフィールドに近づけることが可能となる。

#### 【0049】

ここで、図3に示す本発明の第一の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法では、位相差に比例する屈折率分布を与えるとしたが、本発明はこの例に限定されるものではなく、少なくとも部分的に波面を一致させるような屈折率の与え方であれば、他の屈折率分布を与えても勿論構わない。

#### 【0050】

なお、図5に示したようなアナログ的な屈折率変化は、たとえば石英ガラス光導波路の場合には紫外線照射を用いて実現することができる。

#### 【0051】

図6は、図3に示す本発明の第一の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法を用いて波動伝搬回路の最適化を行った後の、屈折率分布の初期値からの屈折率調整量を表している。図6中の縦軸の正の部分が屈折率を増加した箇所であり、負の部分が屈折率を減少した部分である。実際の屈折率は、この値にコアの屈折率1.45523を加えた値となる。図6に示す屈折率調整量は、本実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法を用いて、最適化位置55が $z=0$ から $z=L$ までのすべての領域を走査されるまで屈折率分布nを改変して得られた結果である。

#### 【0052】

ただし、図4に示した石英ガラス光導波路の場合では屈折率を減少させることは困難である。したがって、石英ガラス光導波路の場合には、紫外線照射を照射して屈折率を変化させる前の状態における導波路のコアおよびクラッドの屈折率を等しく作製し、屈折率を減少したい部分では屈折率増加を小さくし、屈折率を増加させたい部分では屈折率増加を大きくすることで、設計どおりの屈折率分布を実現することができる。

#### 【0053】

図7は、図3の本発明の第一の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法を用いて最適化を行った波動伝搬回路の伝達特性を示している。図7に示すように、入力された光フィールドが設計どおり二分歧されていることが分かる。この場合の損失は0.1dB以下であり、良好な特性が得られることを確認した。

#### 【0054】

図8に本発明の第二の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法のアルゴリズムを示す。図8に示す本発明の第二の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法では、屈折率分布n( $x, y, z$ )の初期値を決定してコンピュータのメモリに格納し、最適化位置を出口に設定する工程16と、入力フィールド $\Phi(x, y, 0)$ が入口 $z=0$ から出口 $z=L$ まで順伝搬したときのフィールド分布 $\Phi(x, y, z)$ を計算してコンピュータのメモリに格納する工程17と、改変された屈折率分布において出力フィールド $\Psi(x, y, z)$ を微小距離 $\Delta z$ だけ逆伝搬させてコンピュータのメモリに格納する工程18と、入口から最適化位置まで順伝搬した入力フィールドと、出口から最適化位置まで逆伝搬した出力フィールドとの波面が一致するようにコンピュータにより屈折率分布を改変する工程14と、最適化位置を微小距離 $\Delta z$ だけ入口側にシフトする工程19と、最適化位置が入口に到達したか判断する工程20を含んでおり、最適化位置が出口から入口に至るまで工程18、工程14、工程19、工程20を繰り返している。

#### 【0055】

ここで、図8の本発明の第二の実施形態の波動伝搬回路の設計方法では、工程16、工程17および工程18の結果をコンピュータのメモリに格納するとしたが、これはこの方法が高速にコンピュータにより計算できる手法を提供できるからである。しかしながら、本発明はこの例に限定されるものではなく、工程16、工程17および工程18の結果は、ハードディスクなど他のコンピュータが読み取り可能な記憶装置に格納しても勿論構わない。

#### 【0056】

このようなアルゴリズムを用いても、図3に示した本発明の第一の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法と同様に、波動伝搬回路の最適化を図ることができる。

#### 【0057】

さらに、図8に示す本発明の第二の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法を用いることで、入力フィールドが順伝搬したときのフィールドを工程17において一括して計算してコンピュータのメモリに格納しておけるので、計算時間のさらなる高速化を図ることができる。

#### 【0058】

図9は、図8に示した本発明の第二の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法の工程11において用いた屈折率分布の初期値である。図9に示すように、一定膜厚のコア51がクラッド層52に埋め込まれており、コアは一辺が $1\mu m$ のモザイク状の構造になっている。

る。クラッド層5.2の屈折率は1.44428であり厚さは60 $\mu\text{m}$ 、コア5.1の屈折率は1.45523で厚さは6 $\mu\text{m}$ である。光回路の入口は $z=0$ 、出口は $z=L=100\mu\text{m}$ である。

#### 【0059】

続いて、図8に示した本発明の第二の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法に従って波動伝搬回路の最適化を行った例を示す。ここで、入力フィールドは幅7 $\mu\text{m}$ 、厚さ6 $\mu\text{m}$ の光導波路の基底モードのフィールドとし、所望の出力フィールドは光回路が波長フィルタとして働くように、波長1.3 $\mu\text{m}$ に対しては $x=20\mu\text{m}$ の位置に、波長1.55 $\mu\text{m}$ に対しては $x=-20\mu\text{m}$ の位置に、前記基底モードのフィールドが出力されるようにした。このように、本発明の波動伝搬回路の設計方法によれば、所望の出力フィールドとして複数の波長を用いることができる。複数の波長を用いる場合には、複数の波長による合成された波面を考えれば一波長の場合と全く同様の手順で設計することができる。

#### 【0060】

なお、本発明の第二の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法では、光回路が波長フィルタとして働くように最適化を行ったが、これは別の機能でも勿論構わない。

#### 【0061】

また、図8に示した本発明の第二の実施形態の波動伝搬回路の設計方法では、工程17および工程18のフィールド計算は三次元ビーム伝搬法を用いてコンピュータにより行った。しかしながら、本発明はこの例に限定されるものではなく、有限差分時間領域法やモードマッチング法など別の手法を用いてフィールド計算を行っても勿論構わない。

#### 【0062】

加えて、図8に示す本発明の第二の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法では、工程14において、波面を一致させるために閾値Tを0 radと定めて、これより大きな位相差の箇所にはコアを、小さな位相差の箇所にはクラッドを配設することとした。図10は、このような屈折率分布の与え方を示している。このように位相の大小に応じた屈折率分布を与えることで、順伝搬させたフィールドと逆伝搬させたフィールドの結合係数を向上させることができ、結果として、入力フィールドを入力したときの出力を所望のフィールドに近づけることが可能となる。さらに、このような屈折率分布の与え方をすることで、コアとクラッド層の二種類の材料、二種類の屈折率からなる作製が容易な波動伝搬回路を提供することができる。しかしながら、本発明はこの例に限定されるものではなく、たとえば位相の大小に応じて三種類の屈折率を与えるなど、全く別の屈折率分布の与え方をしても勿論構わない。

#### 【0063】

屈折率分布を与える場合、コアのサイズが波動の波長に比べて大きいほど、波動伝搬回路の特性が劣化する。また、コアのサイズが小さくなるほど、波動伝搬回路の作製には困難性が伴う。したがって、図10の屈折率分布の与え方では、コアのサイズが波動の波長程度の大きさになるという制限を課した。すなわち、本実施形態では、信号波長が1.3 $\mu\text{m}$ 、1.5 $\mu\text{m}$ 程度であることを考慮して、コアのサイズが波動の波長程度となるように、コアのサイズが1 $\mu\text{m}$ 角より小さくなる場合にはクラッド層の配設を行わないという制限を課した。これは、このようにある程度以上のサイズを有するコア及びクラッド層からなる光回路とすることにより、作製が容易な波動伝搬回路を提供できるからである。このようにしても、本発明の効果を得ることができる。しかしながら、本発明はこの例に限定されるものではなく、コアのサイズは、作製可能な300nm以上であり、かつ入力される波動の波長との関係において、決定すればよい。

#### 【0064】

図11は、図8に示す本発明の波動伝搬回路の設計方法により最適化を行った波動伝搬回路の屈折率分布を示している。ここで、図11の波動伝搬回路を得るために、図8のアルゴリズムを24回適用した。このように、本発明の波動伝搬回路の設計方法は、複数回適用することで良好な特性を得ることができる。

#### 【0065】

図12は、図8に示す本発明の波動伝搬回路の設計方法により波動伝搬回路の最適化を行い、それに基づいて通常の火炎堆積法で作製した石英製の波動伝搬回路の特性を示している。図12(a)は、波長 $1.3\mu\text{m}$ を入力したときのフィールド分布であり、図12(b)は波長 $1.55\mu\text{m}$ を入力したときのフィールド分布である。図11に示しているように、波長によって異なる位置に集光する波動伝搬回路が実現されている。

#### 【0066】

図13は、本発明の第三の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法のアルゴリズムを示す。図13に示す本発明の第三の実施形態の波動伝搬回路の設計方法では、屈折率分布 $n(x, y, z)$ の初期値を決定してコンピュータのメモリに格納し、最適化位置を入口に設定する工程21と、所望の出力フィールド $\Psi(x, y, L)$ が出口 $z=L$ から入口 $z=0$ まで逆伝搬したときのフィールド分布 $\Psi(x, y, z)$ を計算してコンピュータのメモリに格納する工程22と、入口から最適化位置まで順伝搬した入力フィールドと、改変された屈折率分布において入力フィールド $\Phi(x, y, z)$ を微小距離 $\Delta z$ だけ順伝搬させてコンピュータのメモリに格納する工程23と、出口から最適化位置まで逆伝搬した出力フィールドとの波面が一致するようにコンピュータにより屈折率分布を改変する工程14と、最適化位置を微小距離 $\Delta z$ だけ出口側にシフトする工程24と、最適化位置が入口に到達したか判断する工程25を含んでおり、最適化位置が入口から出口に至るまで工程23、工程14、工程24および工程25を繰り返している。

#### 【0067】

ここで、図13の本発明の第三の実施形態の波動伝搬回路の設計方法では、工程21、工程22および工程23の結果をコンピュータのメモリに格納するとしたが、これはこの方法が高速にコンピュータにより計算できる手法を提供できるからである。しかしながら、本発明はこの例に限定されるものではなく、工程21、工程22および工程23の結果は、ハードディスクなど他のコンピュータが読み取り可能な記憶装置に格納しても勿論構わない。

#### 【0068】

このようなアルゴリズムを用いても、図3に示した本発明の第一の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法と同様に、波動伝搬回路の最適化を図ることができる。

#### 【0069】

さらに、図13に示す本発明の第三の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法を用いることで、出力フィールドが順伝搬したときのフィールドを工程22において一括して計算してコンピュータのメモリに格納しておけるので、図8に示した本発明の第二の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法と同じく、計算時間の高速化を図ることができる。

#### 【0070】

図14は、図13に示した本発明の第三の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法の工程11において用いた屈折率分布の初期値である。図14に示すように、一定膜厚のコア51がクラッド層52に埋め込まれており、クラッド層52の屈折率は1.44428であり厚さは $60\mu\text{m}$ 、コア51の屈折率は1.45523で厚さは $6\mu\text{m}$ である。光回路の入口は $z=0$ 、出口は $z=L=1000\mu\text{m}$ である。

#### 【0071】

続いて、図13に示した本発明の第三の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法に従って波動伝搬回路の最適化を行った例を示す。ここで、入力フィールドは幅 $7\mu\text{m}$ 、厚さ $6\mu\text{m}$ の光導波路の基底モードのフィールドとし、所望の出力フィールドは光回路が導波路レンズとして働くように、出力後 $100\mu\text{m}$ 離れた位置に焦点を結ぶように設計した。

#### 【0072】

なお、本発明の第三の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法では、光回路が導波路レンズとして働くように最適化を行ったが、これは別の機能でもよい。

#### 【0073】

また、図13に示した本発明の第三の実施形態の波動伝搬回路の設計方法では、工程22および工程23のフィールド計算は三次元ビーム伝搬法を用いてコンピュータにより行

った。しかしながら、本発明はこの例に限定されるものではなく、有限差分時間領域法やモードマッチング法など別の手法を用いてフィールド計算を行っても勿論構わない。

#### 【0074】

加えて、図13に示す本発明の第三の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法では、工程14において、波面を一致させるために閾値Tを0 radと定めて、コアとクラッドの境界のみについて、これより大きな位相差の箇所では、もともとクラッドであった位置にコアを配設し（コアを追加し）、小さな位相差の箇所では、もともとコアであった位置にコアを配設せずクラッドとする（コアを取り除く）こととした。図15は、このような屈折率分布の与え方を示している。このようにコアとクラッドの境界のみで屈折率分布を変化させることで、上下方向へ波動が散逸しがたい、損失の良好な波動伝搬回路を提供することができる。しかしながら、本発明はこの例に限定されるものではなく、たとえば導波路中央へクラッド層を配設することを許すなど、別の屈折率分布の与え方をしても勿論構わない。

#### 【0075】

さらに、図15の屈折率分布の与え方では、光伝搬方向のコア幅の変化割合を60度以下とした。すなわちコア幅の光伝搬方向に対する最大傾きを60度以下とした。これは、このような制限を与えることでさらに波動の散逸の少ない波動伝搬回路を提供できるからである。しかしながら本発明はこの例に限定されるものではなく、別の角度で制限を与える、制限を与えないても勿論構わない。

#### 【0076】

図16は、図13に示す本発明の第三の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法により最適化を行った波動伝搬回路の屈折率分布を示している。ここで、図16の波動伝搬回路を得るために、図13に示した本発明の第三の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法と、図8に示した本発明の第二の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法を交互に15回適用した。このように、交互に適用することで、波動伝搬回路全体にわたって均一に屈折率分布の改変を行え、良好な特性を得ることができる。このように、本発明の第一乃至三の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法の選択的組み合わせおよび／または繰り返しにより最適化を行なうことができる。

#### 【0077】

図17は、図13に示す本発明の第三の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法により最適化を行った波動伝搬回路の特性を示している。図17は、図16の導波路レンズを二対用いてスラブ光導波路により200 μm離して対向させて損失を測定したものであり、広い波長域にわたって良好な特性が得られていることが分かる。

#### 【図面の簡単な説明】

#### 【0078】

【図1】従来の波動伝搬回路の設計方法のアルゴリズムを示す図である。

【図2】従来の波動伝搬回路の設計方法により設計された光回路の例である。

【図3】本発明の第一の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法のアルゴリズムを示す図である。

【図4】本発明の第一の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法における屈折率分布の初期値を表す図である。

【図5】本発明の第一の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法における屈折率分布の与え方を表す図である。

【図6】本発明の第一の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法における屈折率分布の改変量を表す図である。

【図7】本発明の第一の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法により設計された光回路の特性を表す図である。

【図8】本発明の第二の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法のアルゴリズムを示す図である。

【図9】本発明の第二の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法における屈折率分布

の初期値を表す図である。

【図10】本発明の第二の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法における屈折率分布の与え方を表す図である。

【図11】本発明の第二の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法により設計された光回路の屈折率分布を表す図である。

【図12】本発明の第二の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法により設計された光回路の特性を表す図である。

【図13】本発明の第三の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法のアルゴリズムを示す図である。

【図14】本発明の第三の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法における屈折率分布の初期値を表す図である。

【図15】本発明の第三の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法における屈折率分布の与え方を表す図である。

【図16】本発明の第三の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法により設計された光回路の屈折率分布を表す図である。

【図17】本発明の第三の実施形態に係る波動伝搬回路の設計方法により設計された光回路の特性を表す図である。

【符号の説明】

【0079】

101～105 従来の波動伝搬回路の設計方法における工程

11～26 本発明の波動伝搬回路の設計方法における工程

51 コア

52 クラッド層

53 直線光導波路

54 扇状光導波路

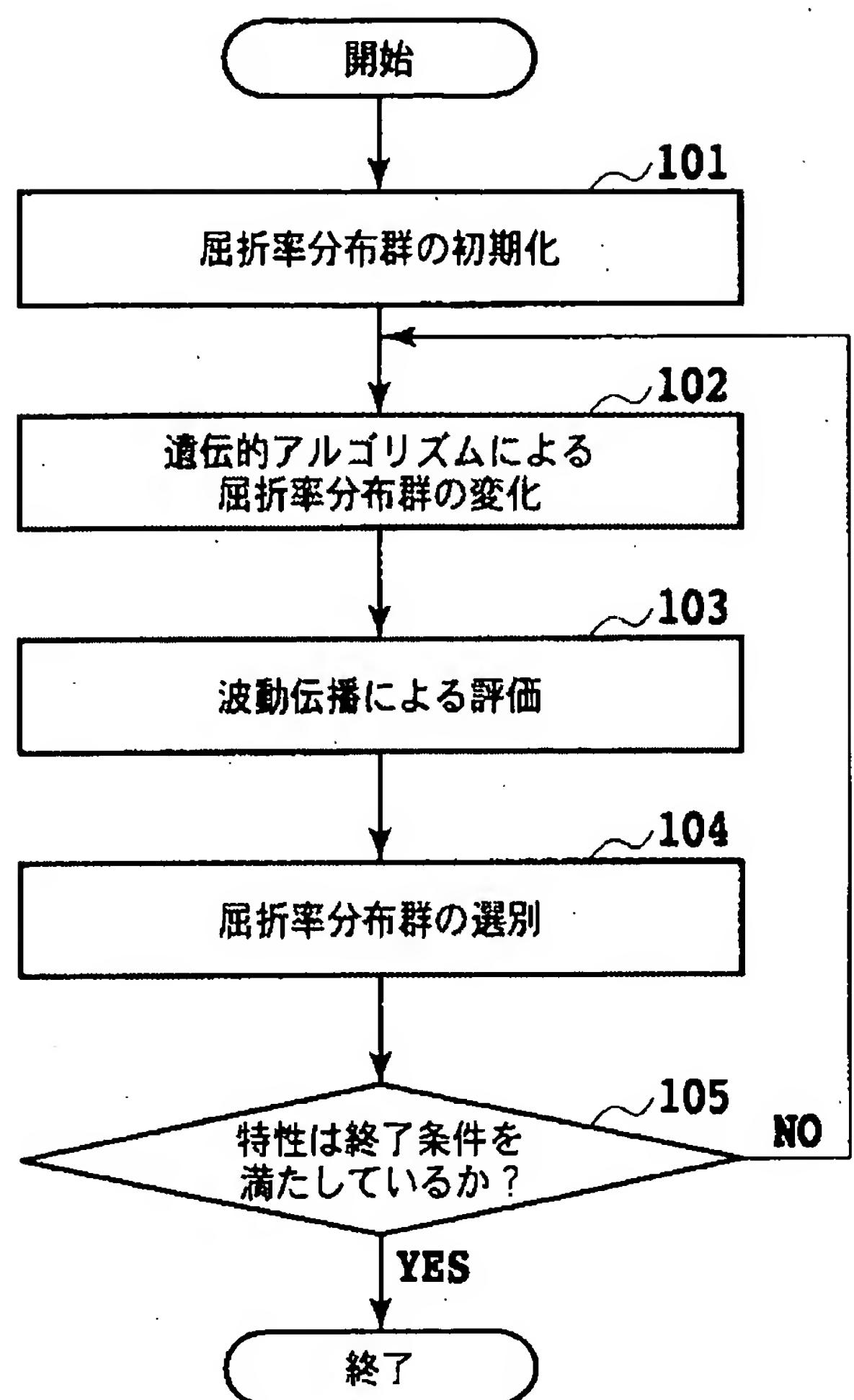
55 最適化位置

201 コア

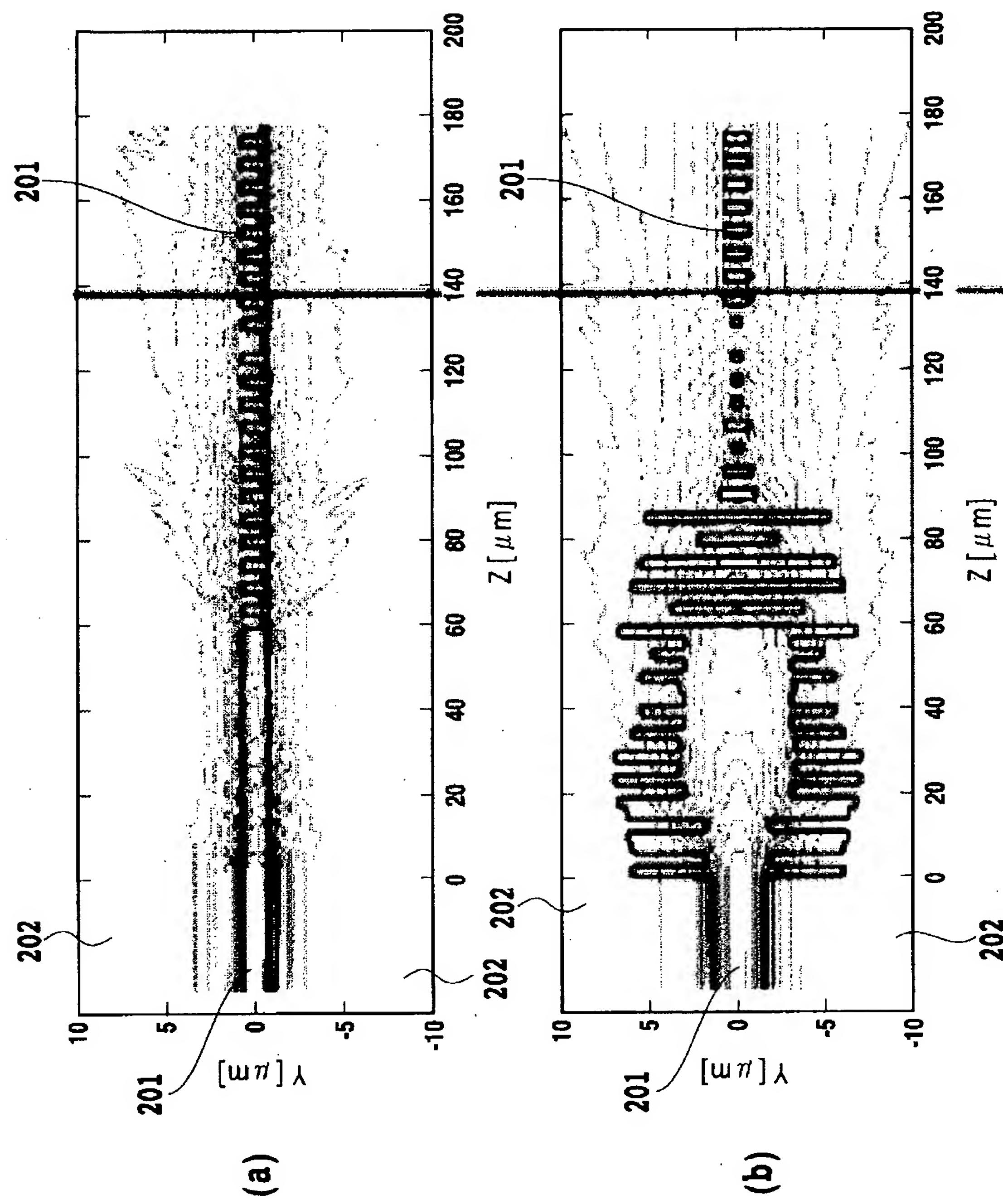
202 クラッド層

【書類名】 図面

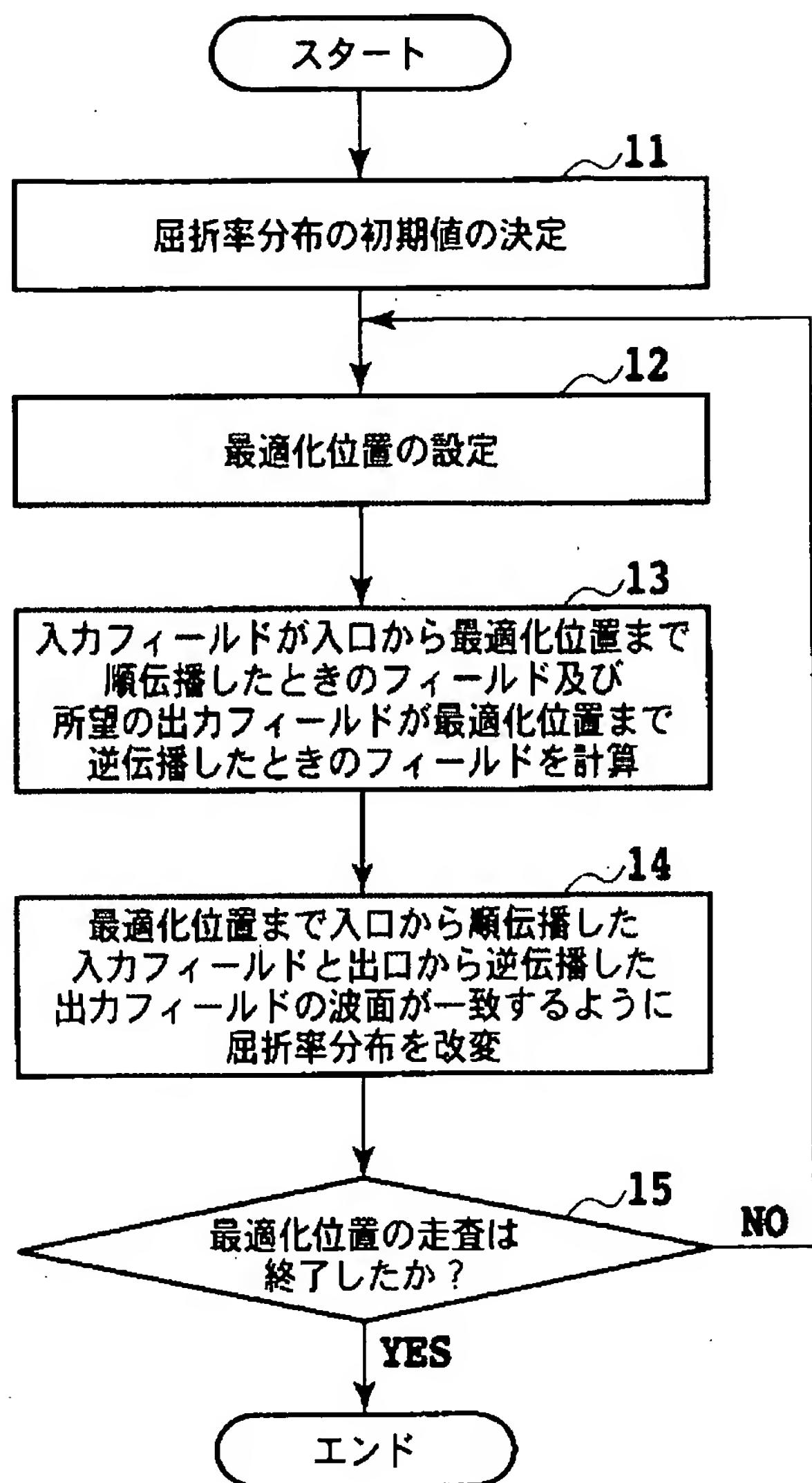
【図 1】



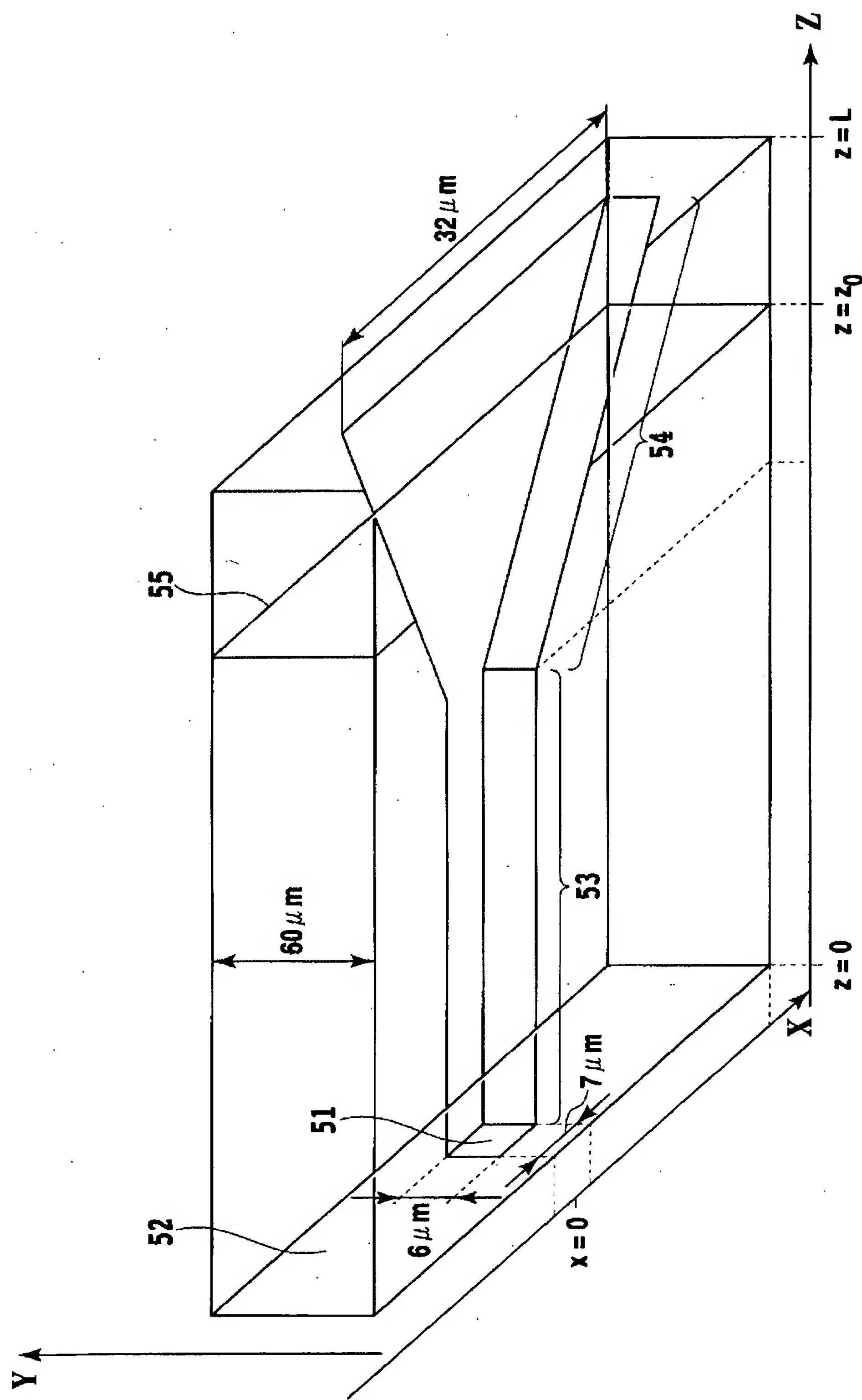
〔図2〕



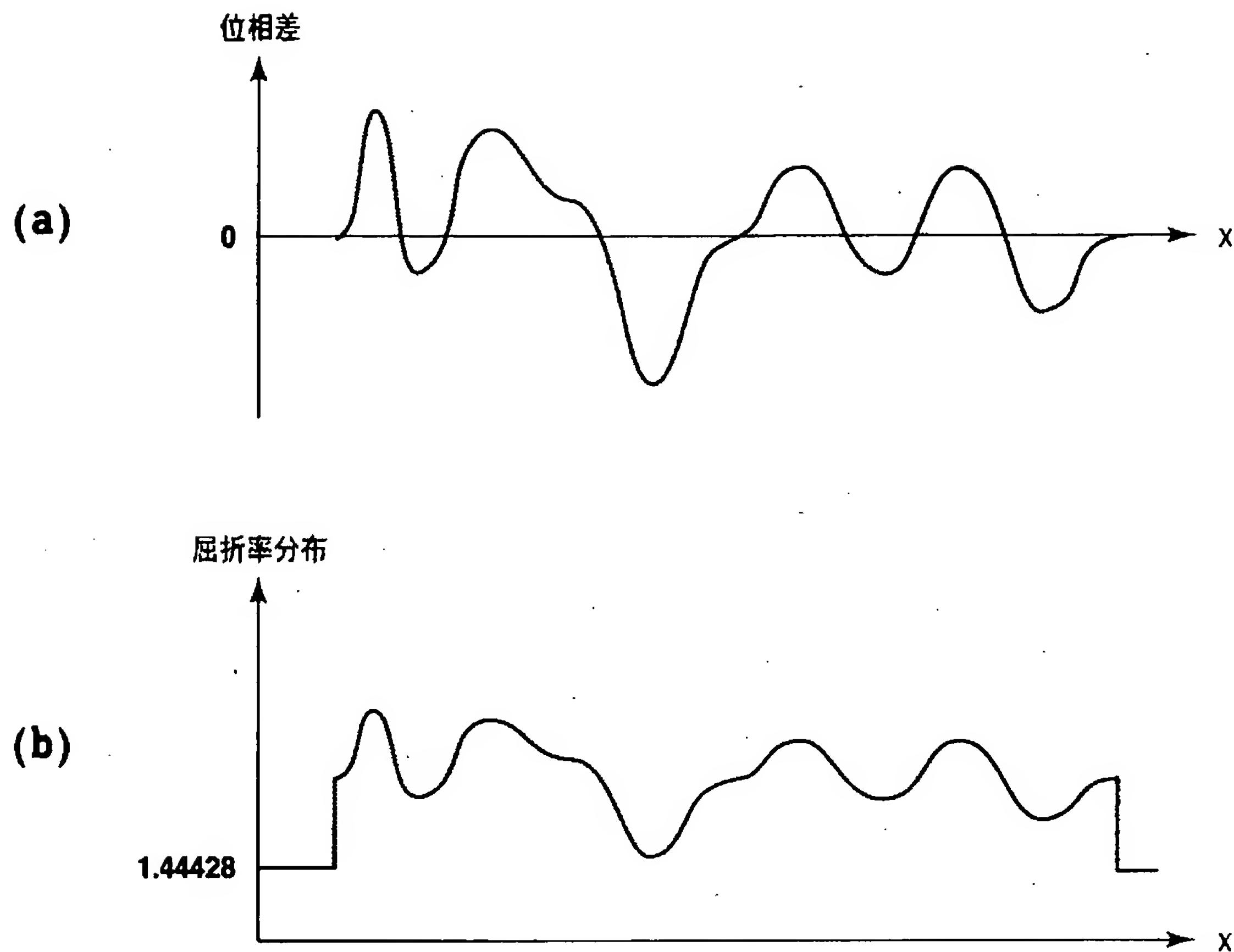
【図 3】



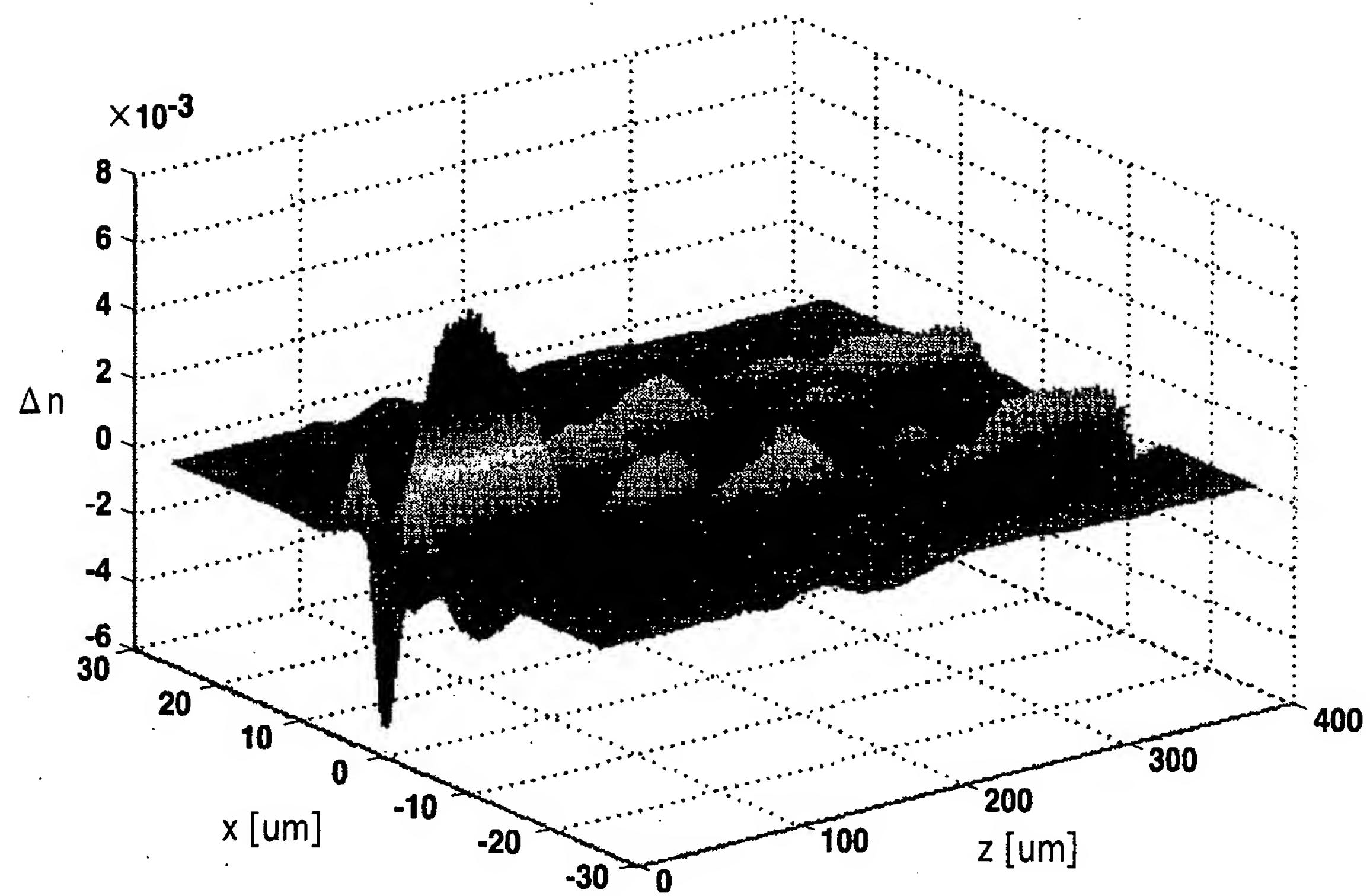
【図 4】



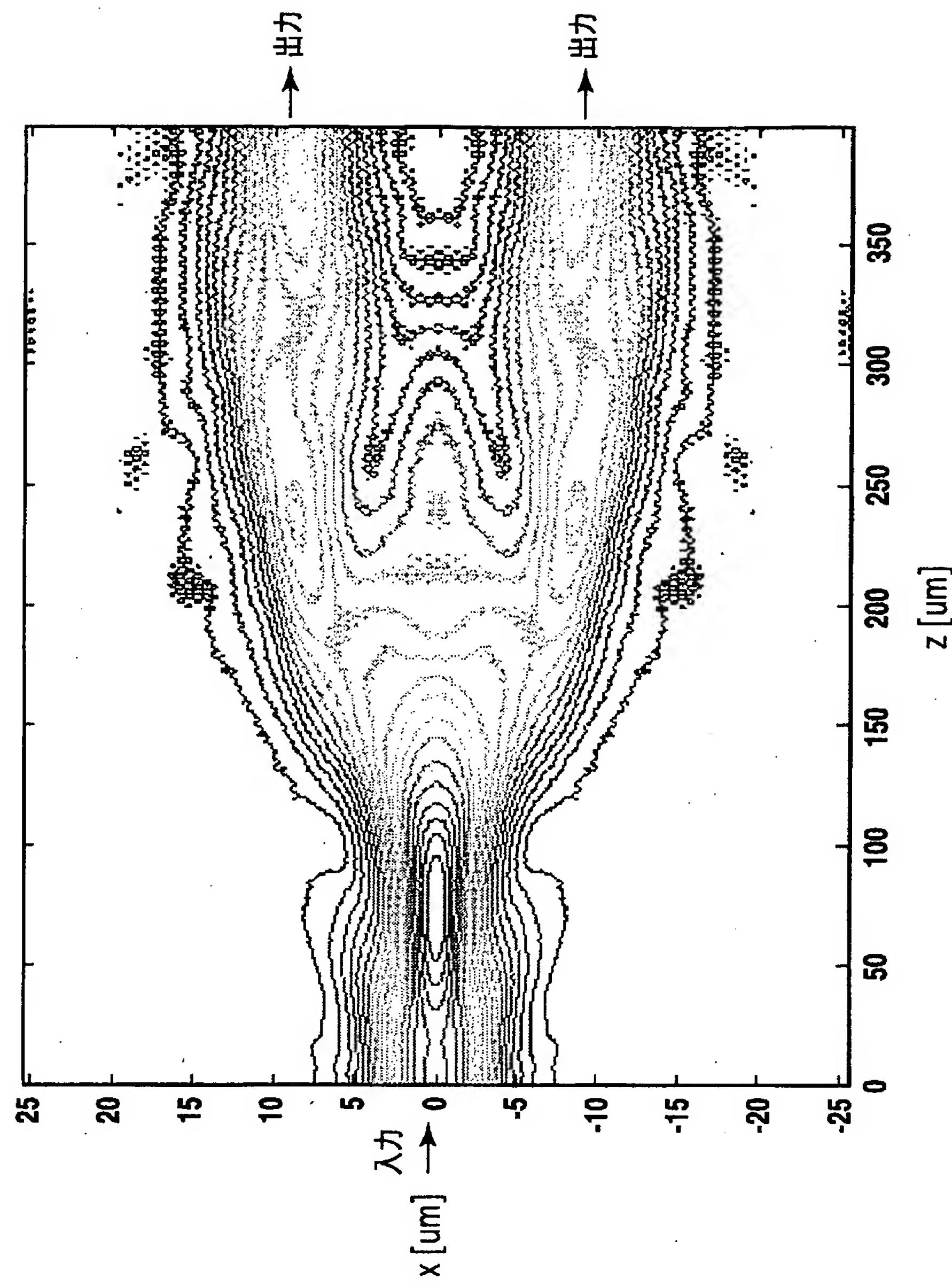
【図 5】



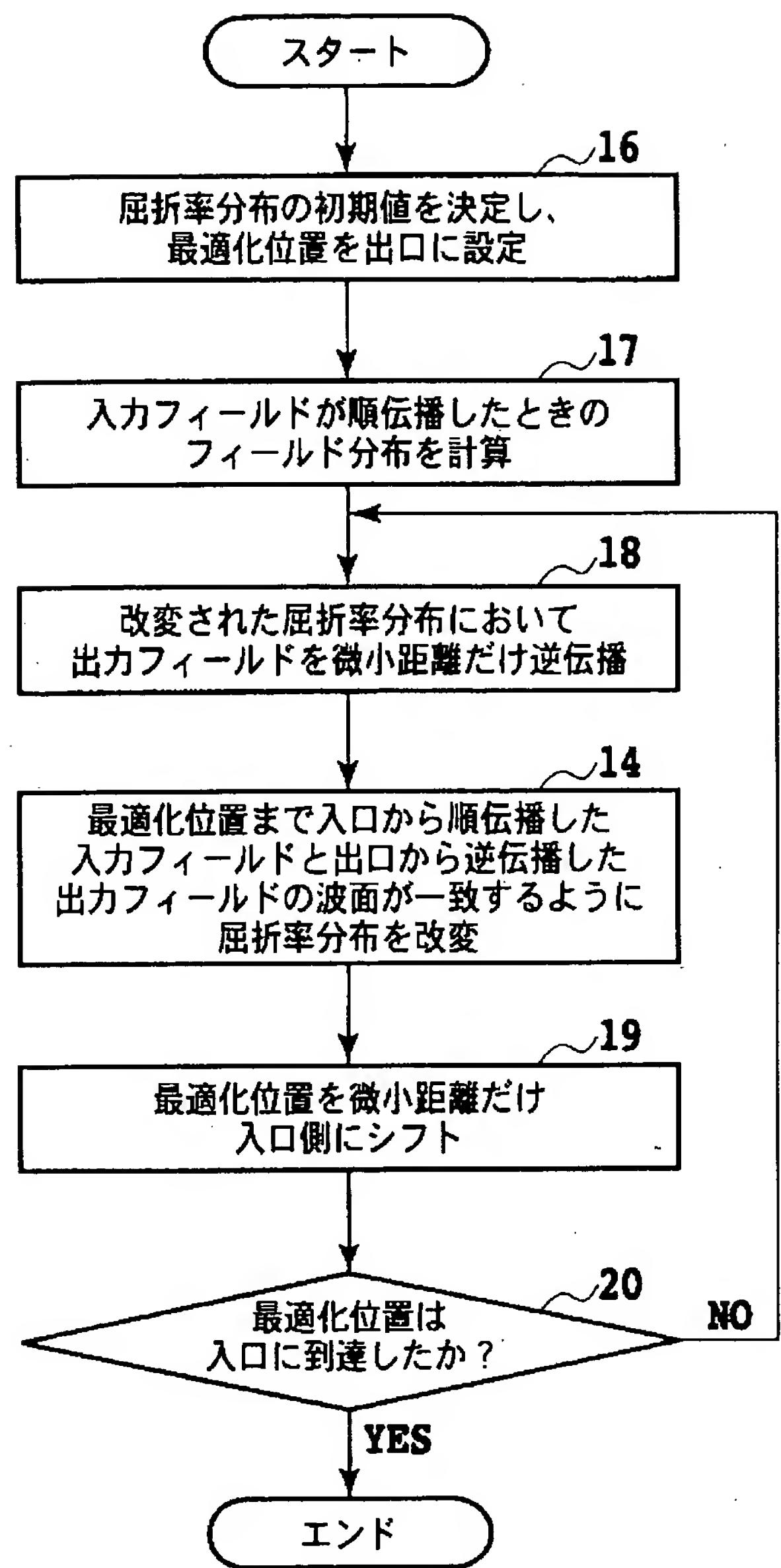
【図 6】



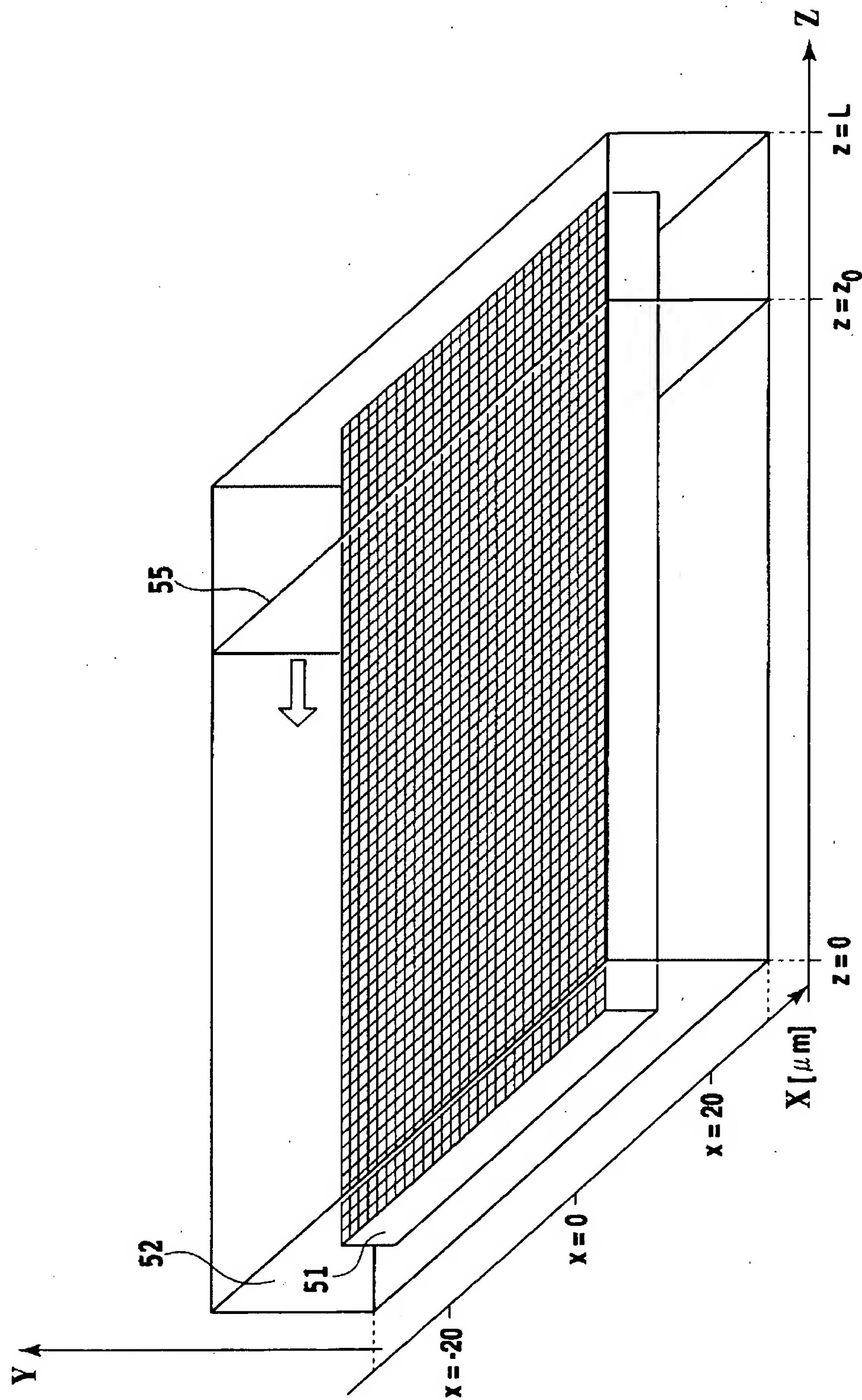
【図 7】



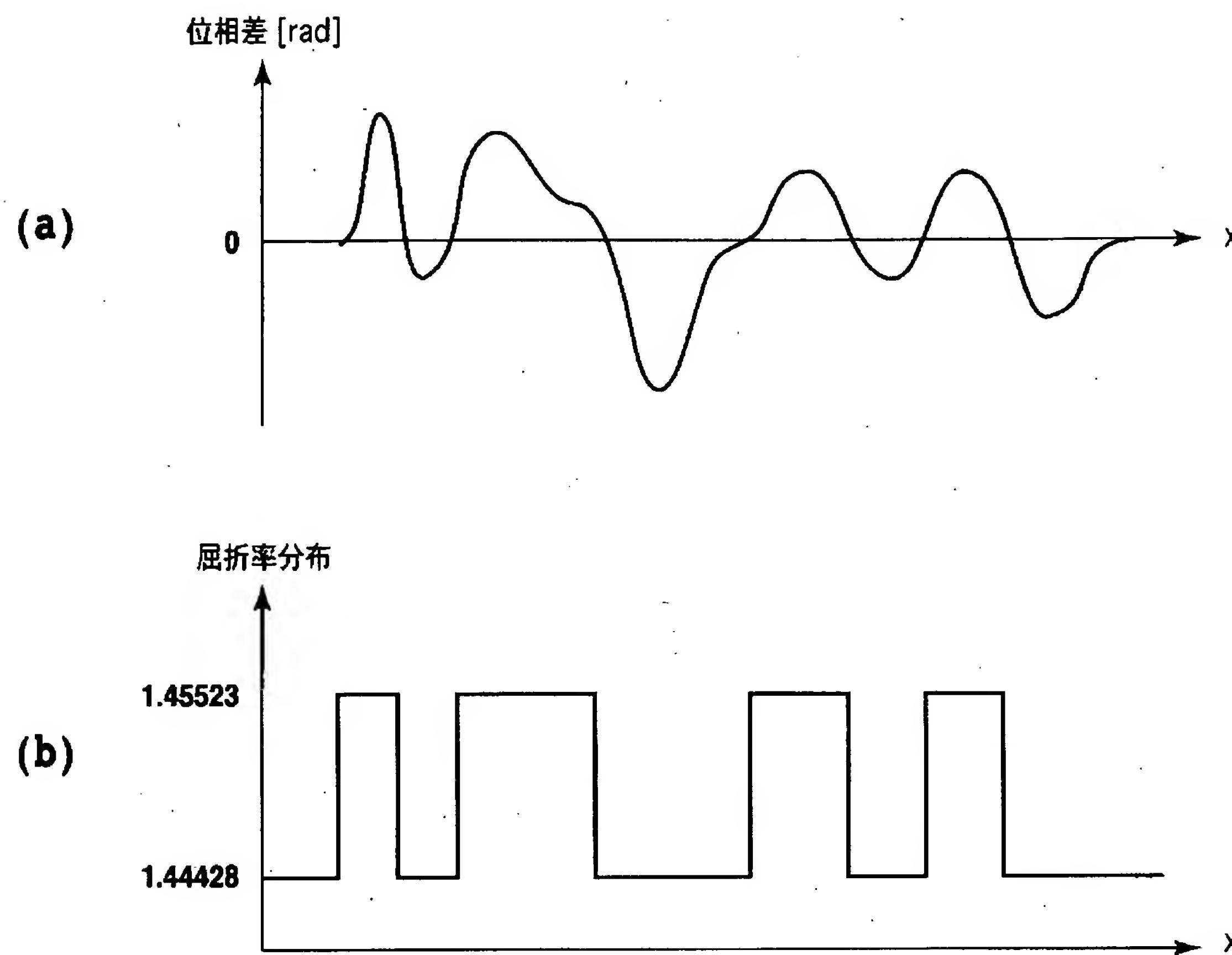
【図 8】



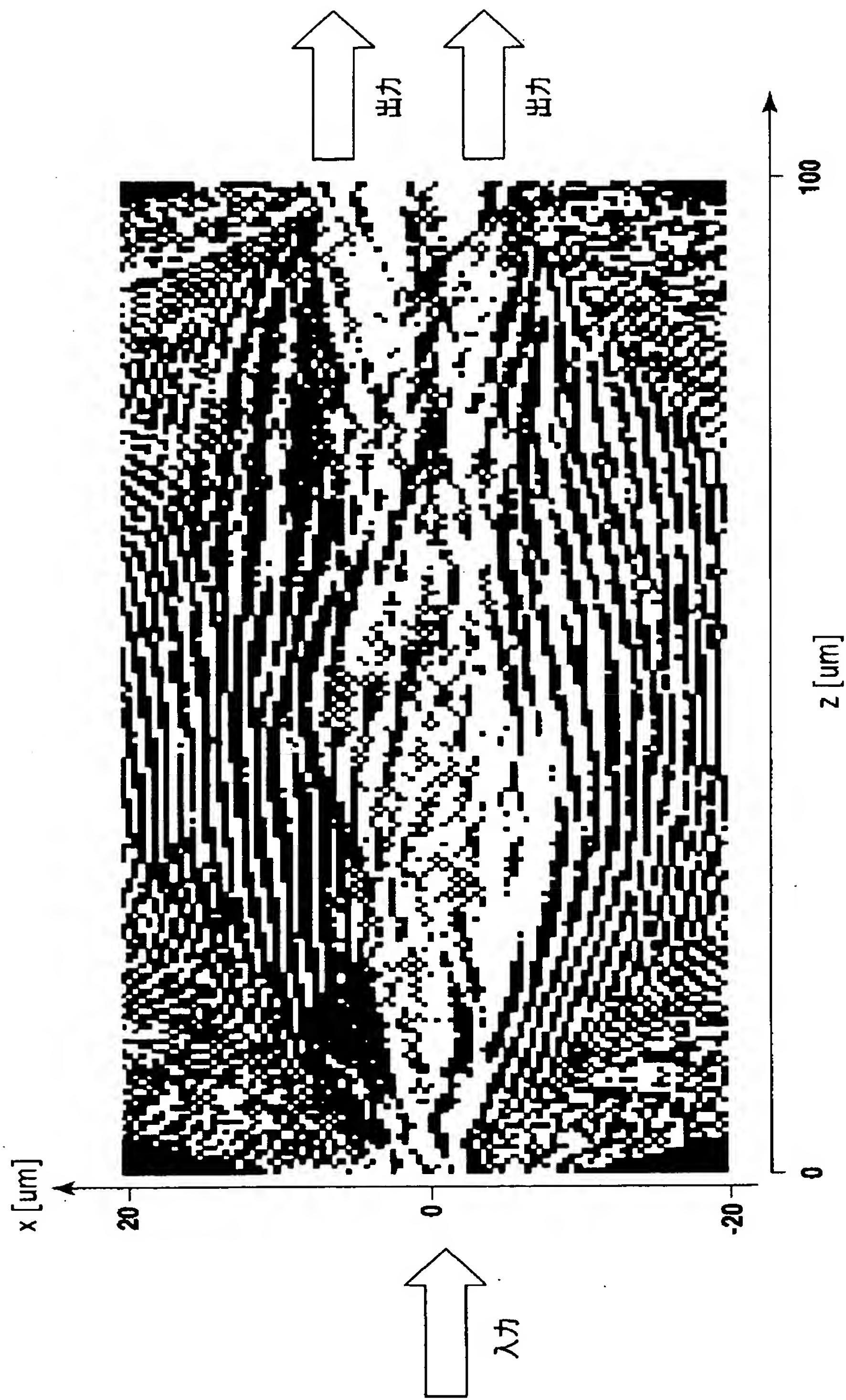
【図 9】



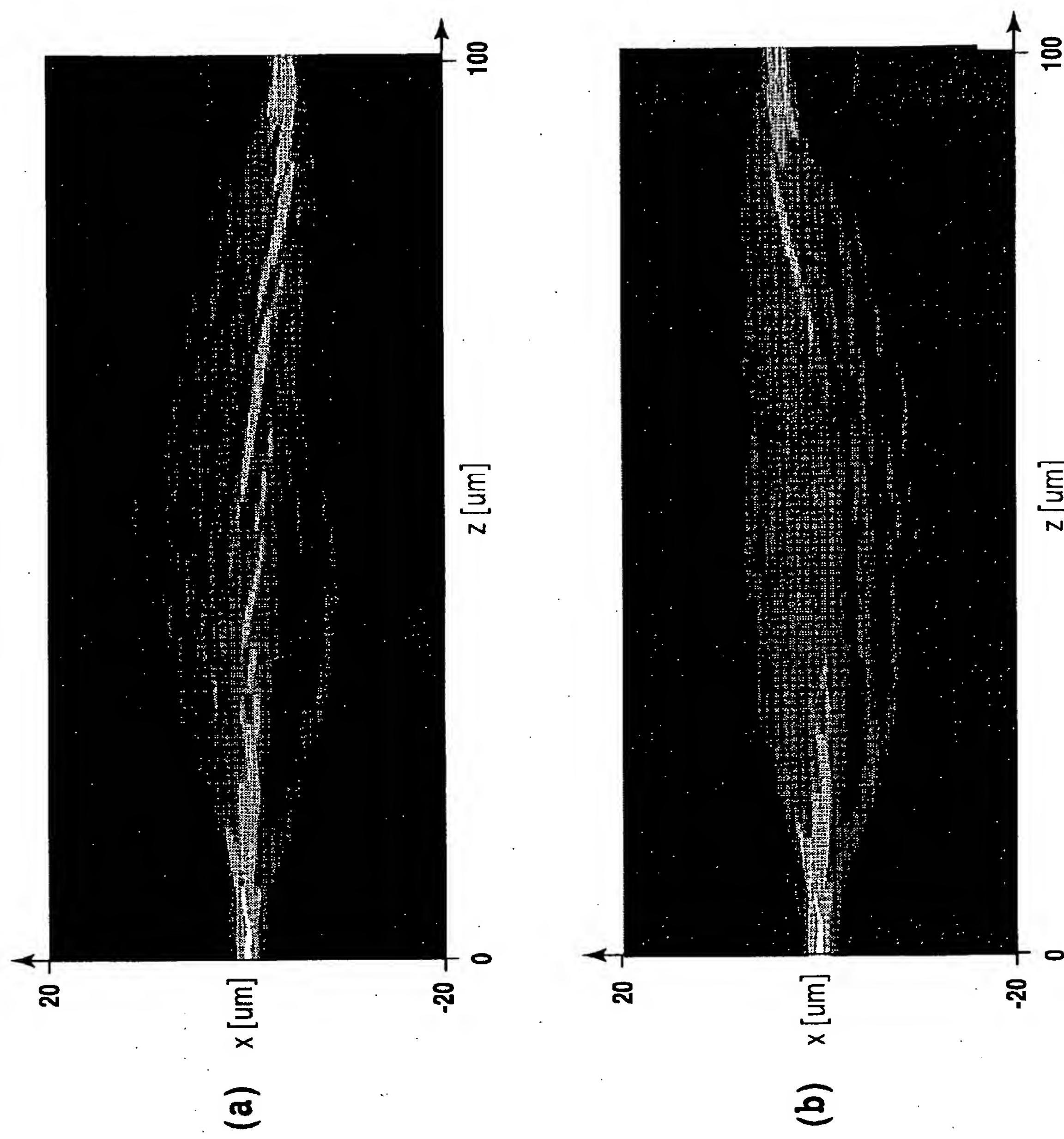
【図 10】



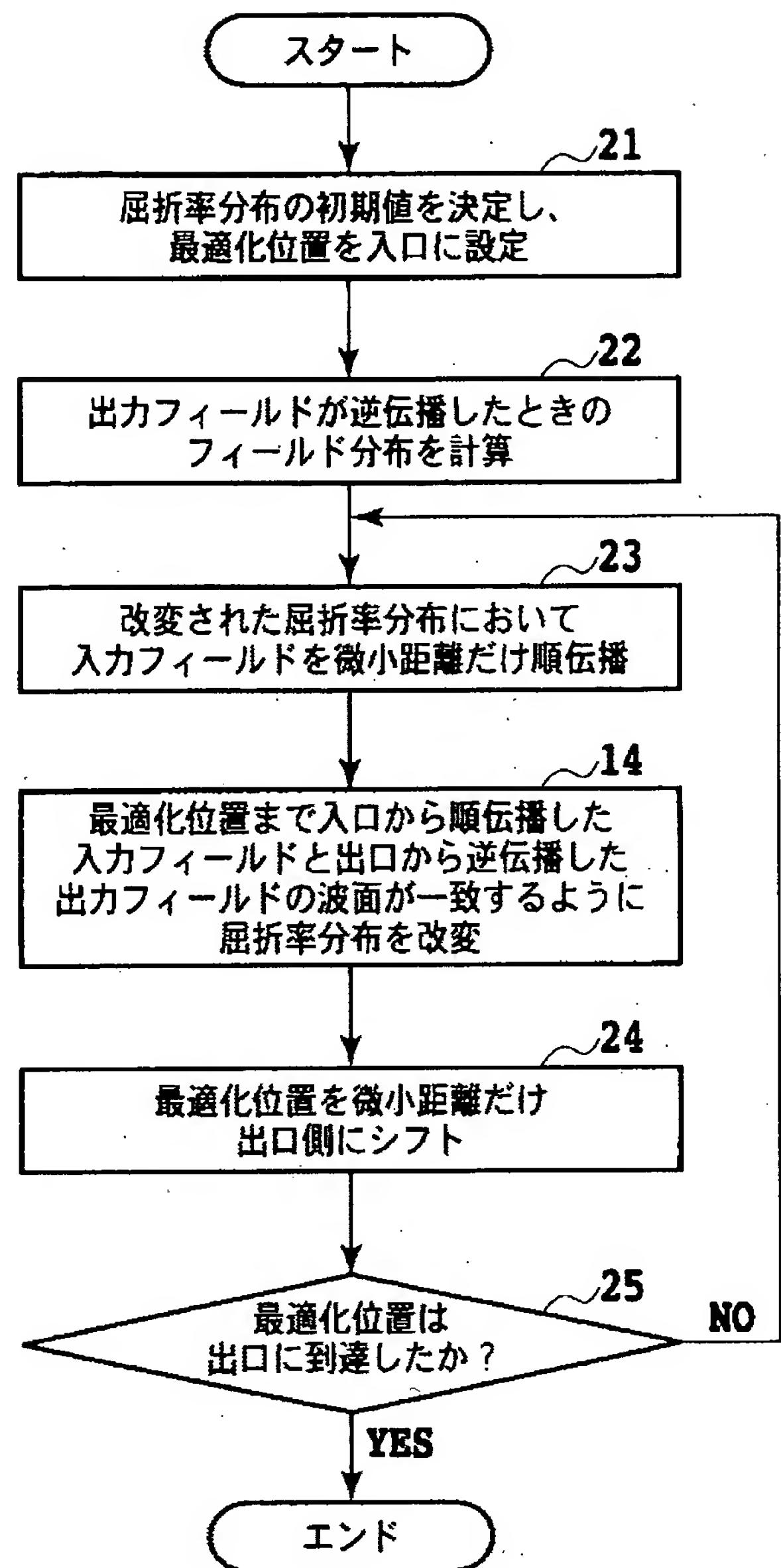
【図 1.1】



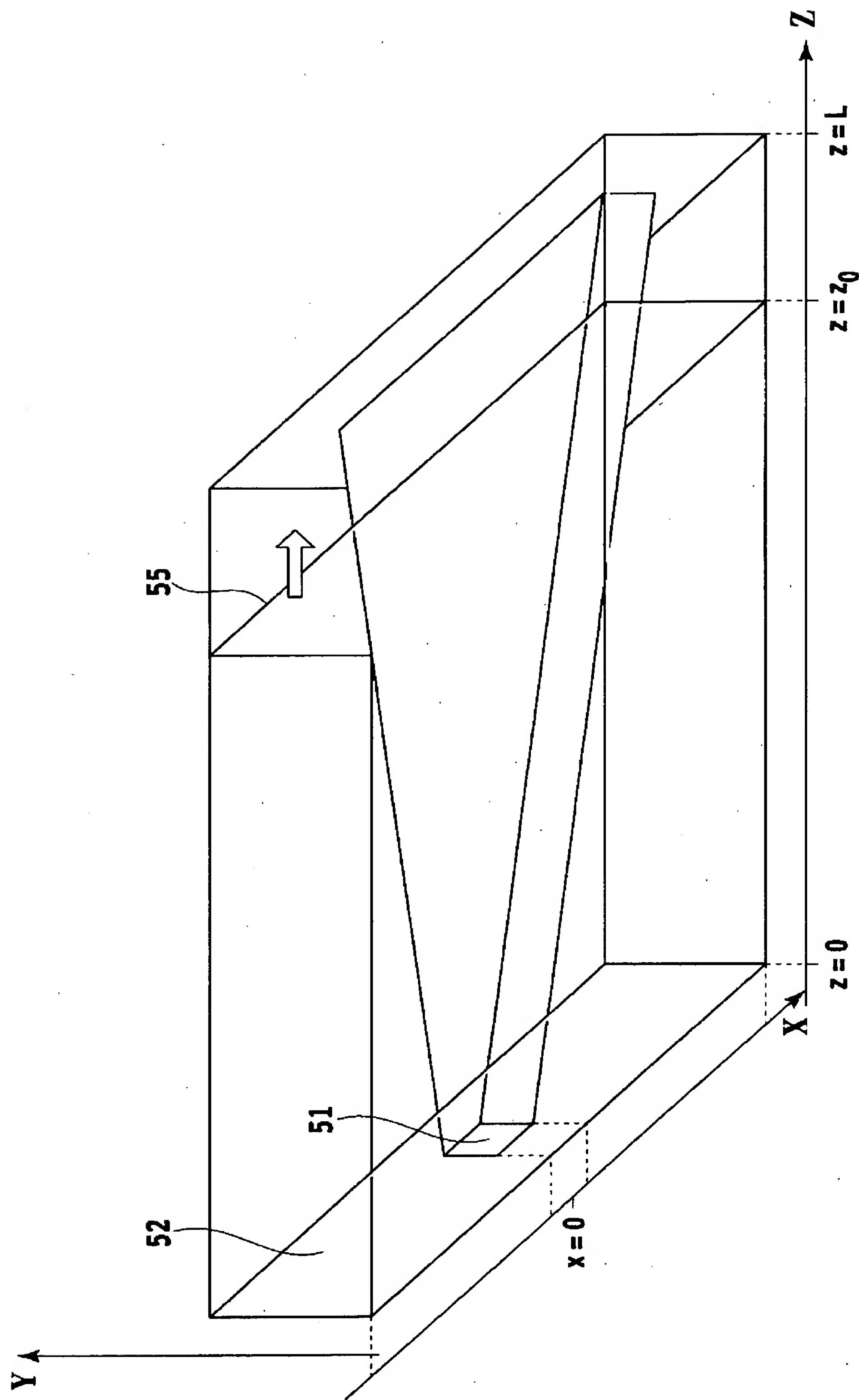
【図 1.2】



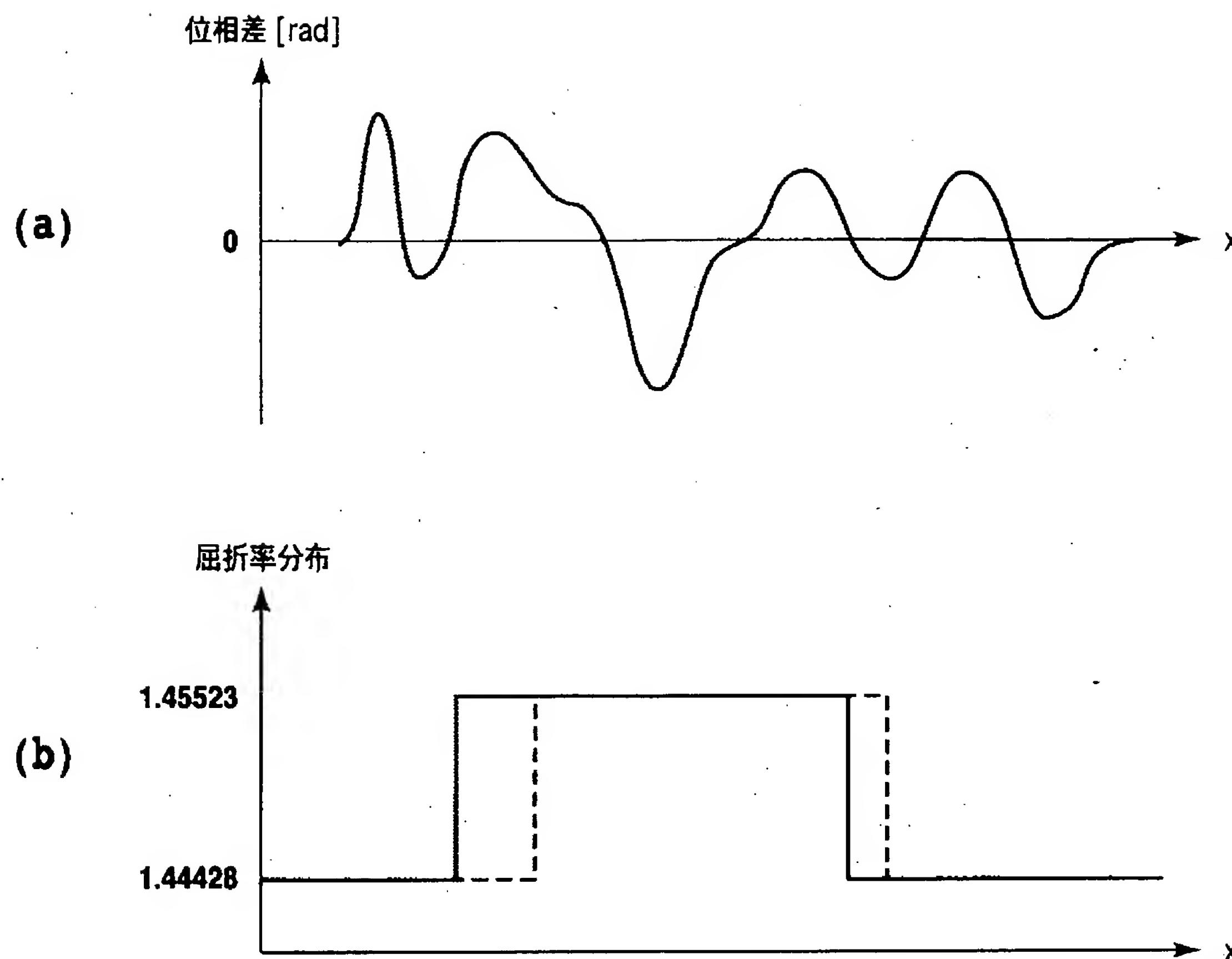
【図 1 3】



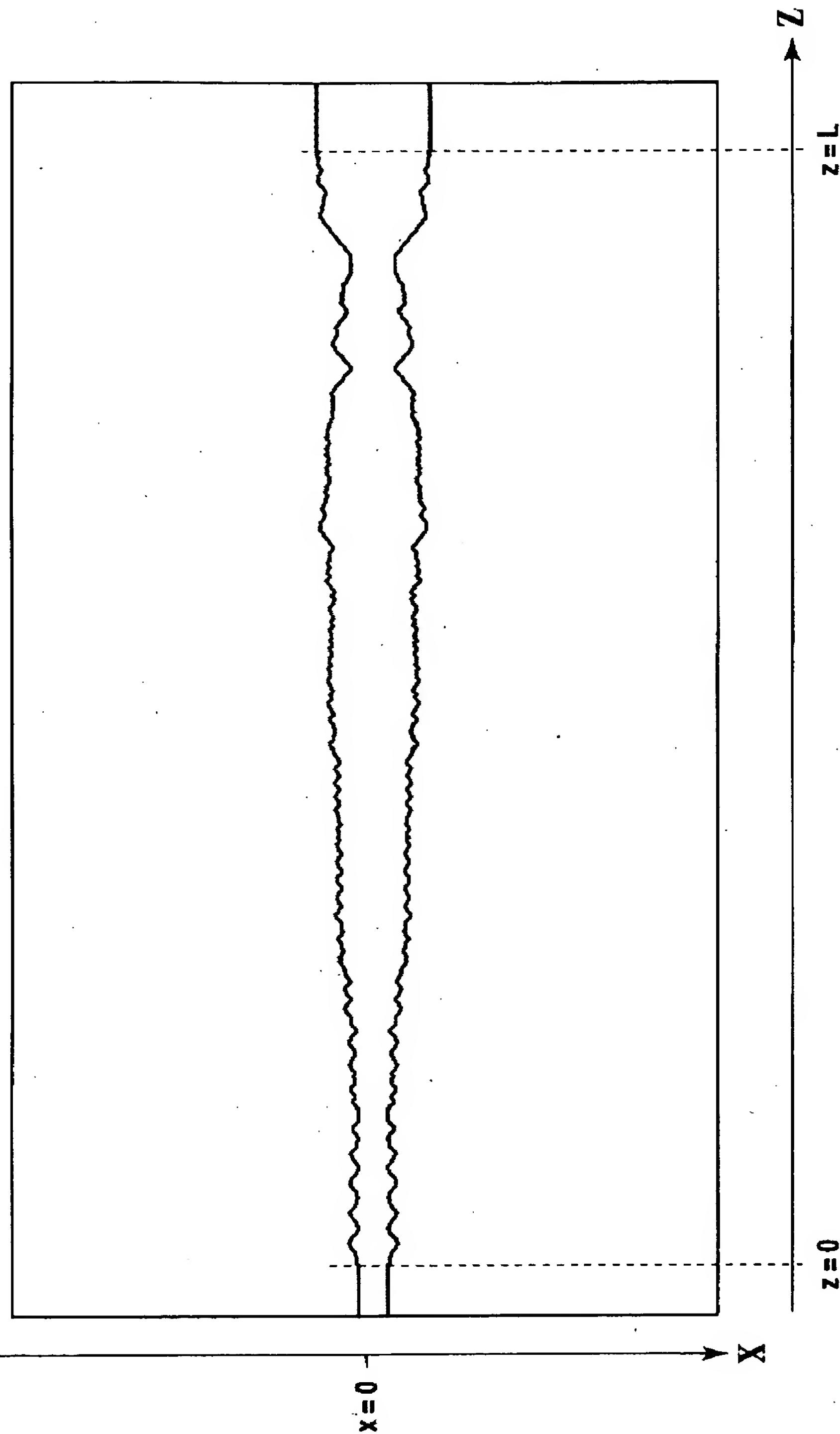
【図 1-4】



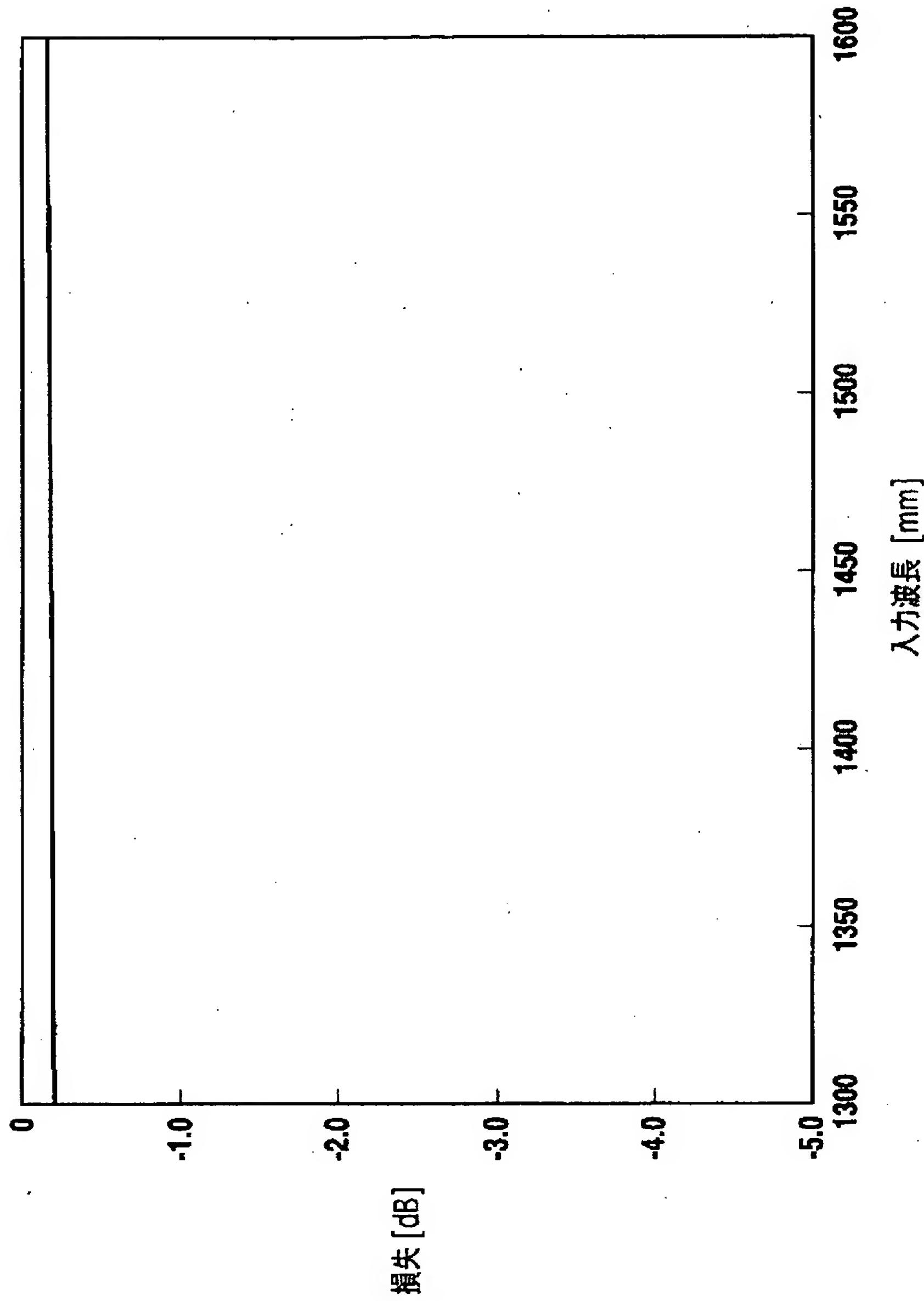
【図 1.5】



【図 1.6】



【図 17】



【書類名】要約書

【要約】

【課題】 最適化された波動伝搬回路を高速に設計する方法、および該方法を実行するコンピュータプログラムを提供する。

【解決手段】 波動伝搬回路における伝搬媒体の屈折率分布の初期値をコンピュータのメモリに格納し、伝達媒体の波動伝搬方向の任意の位置を最適化位置に設定し、入力フィールドが波動伝搬回路の入口から最適化位置まで順伝搬したときのフィールドと、所望の出力フィールドが波動伝搬回路の出口から最適化位置まで逆伝搬したときのフィールドとを計算してコンピュータのメモリに格納し、入力フィールドが順伝搬したときのフィールドと所望の出力フィールドが逆伝搬したときのフィールドとの波面が一致するように、最適化位置における屈折率分布を調整し、最適化位置を波動伝搬方向にランダムに変化させながら、各フィールドの計算および屈折率分布の調整を繰り返す。

【選択図】 図3

出願人履歴

0 0 0 0 0 4 2 2 6

19990715

住所変更

5 9 1 0 2 9 2 8 6

東京都千代田区大手町二丁目3番1号  
日本電信電話株式会社